

Jani Sirpoma

Hitaiden sarjaliikenneyhteysien toteutus pakettiverkoissa

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa . 2010

Työn valvoja:

Prof. Raimo Kantola

Työn ohjaaja:

DI Olli Korpinen



Aalto-yliopisto
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä: Jani Sirpoma

Työn nimi: Hitaiden sarjaliikenneyhteyksien toteutus pakettiverkoissa

Päivämäärä: 1.11.2010

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+81

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitos

Professori: Tietoverkkotekniikka

Koodi: S-38

Valvoja: Prof. Raimo Kantola

Ohjaaja: DI Olli Korpinen

Teleoperaattorit ovat halukkaita korvaamaan nykyiset eri palveluita tuottavat rinnakkaiset verkkonsa yhdellä pakettiverkkoarkkitehtuurilla. Tavoitteena on säästää pääoma- ja operatiivisissa kuluissa ja yksinkertaistaa ylläpitoa. Piirikytkentäiset palvelut eivät kuitenkaan toimi sellaisenaan pakettiverkoissa johtuen puuttuvasta synkronoinnista. Työssä käsiteltävät pseudojohdot ovat emuloituja piirejä, jotka kuljettavat asiakkaan piirikytkentäisen datan tunneleimalla operaattorin pakettiverkon yli huolehtien synkronoinnin säilymisestä. Asiakkaalle verkko näyttää samalta kuin ennenkin.

Työssä tutustutaan eri tekniikoihin, joilla voidaan siirtää piirikytkentäistä hidasta sarjaliikennettä pakettiverkon yli. Työssä käydään läpi lisäksi tärkeimmät sarjaliikennetyypit RS-232 ja E1, televerkkojen synkronointihierarkia, sekä tekniikoita joilla synkronointi voidaan toteuttaa pakettiverkossa. Testiverkossa pyritään tutkimaan mittaamalla, millaisia häiriöitä pseudojohtoemulaatiotekniikka sietää alustana olevalta MPLS-pakettiverkolta säilyttäen synkronoinnin ja tiedonsiirron eheyden. Verkkoon tuotetaan keinotekoista viivettä ja häiriöitä tarkoitusta varten rakennetulla PC-kokoonpanolla. Pseudojohtoemulaatoritarkaisuun käytetään Alcatel-Lucentin SAR-tuoteperheen reitittimiä hyödyntäen CESoPSN ja SAToP-kehystekniikoita.

Testiverkon rajoitteista johtuen tulosten suora vertaaminen kansainvälisiin laatuvaatimuksiin ei ole mahdollista, mutta saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa emulaatoritarkaisulla saavutettavan synkronoinnin laadun riittävän normaalisti toimivissa verkoissa.

Avainsanat: sarjaliikenne, TDM, PDH, E1, RS-232, pseudojohtoemulaatio, CESoPSN, SAToP, TDMoIP, pakettiverkot, synkronointi, adaptiivinen kellon palautus

Author: Jani Sirpoma

Title: Implementing low speed serial connections in packet networks

Date: November 1st, 2010

Language: Finnish

Number of pages: 7+81

Faculty of Electronics, Communications and Automation

Department of Communications and Networking

Professorship: Networking technology

Code: S-38

Supervisor: Prof. Raimo Kantola

Instructor: M.Sc (Tech.) Olli Korpinen

Telecom operators are willing to replace current parallel networks for different services with one packet based network architecture. Their purpose is to save on capital and operational expenditures and simplify network management. However, circuit based services may not work as such in packet based networks due to missing synchronization. Pseudowires are emulated circuits that transport circuit switched customer data over operator's packet network using tunneling methods. This technology can maintain synchronization. Customer does not see any difference in the received service.

This thesis introduces technologies that can transfer low speed serial data over packet networks. Thesis also deals with the most common serial connection types RS-232 and E1, telecom network synchronization hierarchy and synchronization over packet network technologies. Measurements are made in a test network to find out which sort of defects and impairments the pseudowire technologies can handle in MPLS-based packet network, still maintaining proper synchronization and data integrity. Artificial delay, jitter and disturbances are emulated in the network using common PC hardware. Devices under test belong to Alcatel-Lucent SAR product family of routers and they support CESoPSN and SAToP pseudowire technologies.

Due to certain limitations in the test network, direct comparison of results against international quality standards is not possible. However, test results indicate that pseudowire emulation solutions can produce synchronization quality that meets set requirements in well-managed packet networks.

Keywords: serial communication, TDM, PDH, E1, pseudowire emulation, CESoPSN, SAToP, TDMoIP, synchronization, adaptive clock recovery

Esipuhe

Haluan kiittää Corenet Oy:tä mahdollisuudesta kirjoittaa tämä diplomityö muiden töiden ohessa. Erityiskiitokset aiheen tarjoamisesta Timo Kokkolalle, ohjaajana toimineelle Olli Korpiselle, sekä käytännön järjestelyissä auttaneille Sampsamatti Tannerille ja Toni Sandbergille. Kiitos myös työtä oikolukeneille ja kommentoineilla, sekä satunnaisiin kysymyksiin vastanneille.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani kaikesta tuesta näinä opiskeluvuosina ja kaikkia niitä henkilöitä, joiden kanssa olen saanut viettää antoisaa vapaa-aikaa vastapainona tälle työlle.

Helsingissä 1.11.2010

Jani Sirpoma

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	i
Abstract.....	ii
Esipuhe	iii
Sisällysluettelo	iv
Lyhenneluettelo.....	vi
1 Johdanto	1
1.1 Diplomityön tausta.....	1
1.2 Tutkimusongelma	1
1.3 Diplomityön rakenne	2
2 Verkkojen kehityshistoria ja konvergenssi	4
2.1 Operaattorin haasteet usean verkkoalustan ympäristössä	5
2.2 Nykyinen sarjaliikenteen toteutustapa siirtoverkon yli.....	6
3 Sarjamuotoinen tiedonsiirto	8
3.1 Asynkroninen ja synkroninen sarjaliikenneväylä.....	8
3.1.1 Sarjaliitäntä RS-232	9
3.2 Aikajakoinen kanavointi	10
3.2.1 E1-kehysrakenne	10
4 Televerkon arkkitehtuurit ja synkronointi	12
4.1 Synkroniset verkot	12
4.2 Signaalin vaihevaihtelu liitäntärajapinnoissa	13
4.3 Kellosynkronointihierarkiat.....	13
4.4 Vaihelukittu silmukka.....	15
4.5 Kellojen ominaisuudet	16
5 Pseudojohtoemulaatiotekniikat	17
5.1 Standardointiorganisaatiot.....	17
5.1.1 Kansainvälisen televiestintäliitto (ITU)	18
5.1.2 Internet Engineering Task Force (IETF)	18
5.1.3 Metro Ethernet Forum (MEF)	19
5.2 Pseudojohtoemuloidun palvelun referenssiarkkitehtuuri.....	19
5.3 Emulointipalvelun luonti MPLS-verkossa	20
5.4 TDM-tyypit ja siirtotekniikat	21
5.4.1 Rakenteeton siirto	21
5.4.2 Rakennetietoinen siirto.....	21
5.5 Pseudojohto-otsaketyyppi	24
5.6 Emulaatiostandardit	25
5.6.1 Rakenteeton siirto pakettiverkossa (SAToP)	25
5.6.2 Rakennetietoinen aikajakokanavoitu piiriemulaatio pakettiverkoissa (CESoPSN)	26
5.6.3 RAD:n aikajakokanavointi pakettiverkoissa (TDMoIP)	28
5.6.4 Yhteenveto piiriemulaatiostandardeista	28
6 Kellojen synkronointi pakettiverkoissa	30
6.1 Piiri- ja pakettikytkentäisten verkkojen erot	31
6.2 Synkronointivaihtoehdot pakettiverkoissa	31
6.2.1 Verkkosynkronoitu toiminta	31
6.2.2 Differentiaalinen kellon palautus.....	32
6.2.3 Synkronoidut asiakaslaitteet	32
6.2.4 Adaptiivinen kellon palautus	33
6.2.5 IEEE 1588 tarkan ajanmäärittelyn protokolla (PTP)	34
6.2.6 Synkroninen Ethernet (SyncE)	35

7	Mittausten teoria.....	37
7.1	TDM hälytyssignaalit.....	37
7.2	Keskeiset määritelmät.....	37
7.3	Bittivirheiden havaitseminen.....	39
7.4	Suorituskykymittarien soveltaminen	39
7.5	Suorituskykytavoitteiden mitoitus testiverkkoon	40
7.6	Mittautuloksen luotettavuuden laatusuureet	42
7.7	Kellosignaalin stabiiliuden mittasuureet.....	43
7.8	Luiskahdustiheyden määrittäminen	45
8	Testiympäristö.....	46
8.1	Laitteet	46
8.1.1	Alcatel-Lucent 7705 SAR-8 reititin.....	46
8.1.2	JDSU HST-3000 TDM-mittalaite.....	48
8.1.3	Linux PC.....	48
8.1.4	Windows PC:t.....	48
8.2	Ohjelmistot	49
8.2.1	Taustaliikenteen tuottaminen verkkoon	49
8.2.2	Viiveen emulointi verkkoon	49
8.2.3	Pakettiliikenteen rakenteen analysointi.....	50
8.3	Testiverkon topologia	50
8.4	Mittausprosessi ja testitapaukset	52
8.5	Liikennetyyppien ominaisuudet	53
9	Tulokset	55
9.1	Verkkokortin asetusten säätö.....	56
9.2	Emuloidun viiveen toteutuminen testiverkossa.....	57
9.3	Kiertoaikaviive TDM-liikenteellä	59
9.4	Kehystystyyppien sisältö.....	60
9.5	Synkroninen RS-232 sarjaliikenne	61
9.6	Adaptiivisen kellon taajuustarkkuus.....	61
9.6.1	Tyypillinen luiskahdustiheys.....	62
9.6.2	Verkon kuormituksen vaikutus optimaalisissa olosuhteissa	62
9.6.3	Viiveen vaikutus taajuuseroon liikennetyypeittäin.....	65
9.6.4	Pitkän mittausajan vaikutus viivästetyn liikenteen tuloksiin.....	67
9.6.5	Viivästettyjen linkkien vertailu.....	67
9.6.6	Viiveen ja taustaliikenteen yhteisvaikutus	69
9.6.7	Kupari- ja kuituyhteyden vertailu	70
9.7	Virheiden esiintyminen mittauksissa	71
9.7.1	Liikennetyyppien erot ja suorituskykymittarien käyttö	71
9.7.2	Bittivirheiden jakautuminen pitkällä mittausajalla	72
9.7.3	Tasaisesti esiintyvä luiskahtelu.....	73
9.7.4	Reitin vaihtumisesta (linkkikatkoista) syntyvät virheet.....	74
9.8	Pakettiverkkopohjainen ratkaisumalli sarjaliikennelaitteiden verkottamiseen	74
10	Yhteenveto	76
10.1	Johtopäätökset	76
10.2	Jatkokehityskohteet.....	77
	Lähteet	78
	Liitteet.....	82

Lyhenneluettelo

AAL	ATM Adaptation Layer
ACR	Adaptive Clock Recovery
AIS	Alarm Indication Signal
ANSI	American National Standards Institute
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BITS	Building Integrated Timing System
BPM	Bits Per Million
BPS	Bits Per Second
CAS	Channel Associated Signalling,
CCS	Common Channel Signalling
CE	Customer Edge
CES	Circuit Emulation Service
CESoPSN	Circuit Emulation Service over Packet Switched Network
CRC	Cyclic Redundance Check
DCE	Data Circuit-terminating Equipment
DCR	Differential Clock Recovery
DSL	Digital Subscriber Line
DTE	Data Terminal Equipment
DVB	Digital Video Broadcasting
EB	Errored Block
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIA	Electronic Industries Alliance
ES	Errored Second
ESR	Errored Second Ratio
FAS	Frame Alignment Signal
FIFO	First In First Out
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
HDLC	High-Level Data Link Control
HRP	Hypothetical Reference Path
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ISOC	Internet Society
ITU	International Telecommunications Union,
IWF	Interworking Function
L2TP	Layer 2 Tunneling Protocol
LDP	Label Distribution Protocol
LOS	Loss of Signal
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switching Router
LTE	Long Term Evolution
MEF	Metro Ethernet Forum
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MTIE	Maximum Time Interval Error

MTU	Maximum Transmission Unit
NTP	Network Time Protocol
OCXO	Oven Controlled Crystal Oscillator
OOF	Out-of-Frame
OSI	Open Service Interconnection
OPEX	Operational Expenditure
PCM	Pulse Code Modulation
PDH	Plesynchronous Digital Hierarchy
PDU	Protocol Data Unit
PDV	Packet Delay Variation
PE	Provider Edge
PLL	Phase Locked Loop
PPB	Parts Per Billion
PPM	Parts Per Million
PRS	Primary Reference Source
PRC	Primary Reference Clock
PSN	Packet Switched Network
PTP	Precision Timing Protocol
PWE	Pseudowire Emulation
RDI	Remote Defect Indication
RFC	Request For Comments
SAToP	Structure-Agnostic Transport over Packet
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SEC	SDH Equipment Clock,
SES	Severely Errored Second
SESR	Severely Errored Second Ratio
SFP	Small Form-factor Pluggable
SRTS	Synchronous Residual Time Stamp
SSM	Synchronization Status Message
SSU	Synchronization Supply Unit
STM	Synchronous Transfer Mode
SyncE	Synchronous Ethernet
TCP	Transmission Control Protocol
TDEV	Time Deviation
TDM	Time Division Multiplexing
TDMoIP	Time Division Multiplexing over IP
TE	Time Error
TIE	Time Interval Error
TVAR	Time Variance
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
UI	Unit Interval
USB	Universal Serial Bus
USRT	Universal Synchronous Receiver/Transmitter
UTC	Coordinated Universal Time
VLAN	Virtual Local Area Network

1 Johdanto

1.1 Diplomityön tausta

Tietoliikennemarkkinat ovat olleet 1990-luvulta lähtien suurien rakenteellisten ja teknisten muutosten kohteena. Erilaisten televerkkojen, kuten puhelin-, data-, matkaviestin-, radio- ja televisioverkkojen, yhdentyminen on käynnissä kohti yhtä pakettipohjaista verkkoa. Useiden sovellusten ja järjestelmien jakaman pakettiverkon tai sen yhteyksien ominaisuudet eroavat suuresti kiinteiden, vain yhteen käyttötarkoitukseen varattujen yhteyksien ominaisuuksista. Näillä uusilla ominaisuuksilla tavoitellaan verkon ja palveluiden luotettavuutta, turvallisuutta, laajennettavuutta sekä kaiken perustana myös kustannustehokkuutta.

Palvelujen ostajat voivat olla hyvinkin konservatiivisia ja he haluavat säilyttää olemassa olevat ratkaisut sellaisenaan, mikä sotii operaattorin tavoitteita vastaan ja hankaloittaa modernisointia. Haasteena on säilyttää nämä asiakkaat siirtymävaiheen yli tarjoten asiakkaan näkökulmasta samaa palvelua kuin ennenkin. Suora siirtyminen ratkaisusta toiseen ei ole kustannuksista johtuen useinkaan mahdollista yhdellä kertaa, vaan täytyy edetä vaiheittain. On luonnollista, että kehitystä tapahtuu ensin puumaisen verkon runko-osassa, josta se etenee vähitellen kohti loppukäyttäjiä.

Vuorossa on seuraavaksi liitäntäverkon piirikytkentäisen laitekannan korvaaminen uudemmilla tekniikoilla. Piirikytkentäiset laitteet muodostavat puumaisen verkkorakenteen rungosta haarautuvat oksat. Vanhojen toteutusten, kuten sarjaliikenneyhteyksien, liittäminen uudentyyppiseen verkkoon vaatii sovitusratkaisuja, sillä itse sovellusta ei haluta lähteä helpolla muuttamaan. Sovellukset sijoittuvat puumaisen rakenteen lehtiin.

Ethernet on vakiinnuttanut asemansa suorituskykyisenä ja kustannustehokkaana tapana yhdistää verkkoja toisiinsa käyttäen massamarkkinoilla olevia tuotteita. Alkuun lähiverkkoihin kehitetty tekniikka on levinnyt yhä laajemmalle ja runkoverkot perustuvat yhä enemmän Ethernetiin, joten on järkevää alkaa sovittamaan verkon reunalla olevia sarjaliikennettä käyttäviä asiakaslaitteita sen kanssa yhteensopiviksi. Uudet laitteet voidaan varustaa suoraan Ethernet-liitännällä, mutta vanhojen laitteiden kanssa tarvitaan toimintoa, joka osaa muuntaa sarjaliikenteen pakettiliikenteeksi.

Enenevässä määrin myös kriittinen operatiivinen tietoliikenne siirtyy pakettipohjaisiin verkkoihin, minkä seurauksena tuotetarjonta vanhojen järjestelmien soveltamiseksi on lisääntynyt. Vastauksena kysyntään ovat pseudojohto-emulaatiotekniikat, joilla piirikytkentäisiä palveluita voidaan tuottaa pakettiverkkojen yli. Laittevalmistajat ovat tuoneet markkinoille laitteita, joilla voidaan kerätä liikennettä erilaisista rajapinnoista ja muokata uuteen infrastruktuuriin sopivaksi yhdessä laitteessa. Tällaisesta laitteesta voidaan käyttää esimerkiksi nimeä palveluita keräävä reititin.

1.2 Tutkimusongelma

Tämä diplomityön toimeksiantajana on palveluntarjoaja, jonka kohdeasiakaskunta muodostuu yhteiskunnan perusinfrastruktuuriin lukeutuvista yrityksistä ja yhteisöistä. Näiden toimijoiden tarvitsemalle operatiiviselle tietoliikenteelle on ominaista korkean toimintavarmuuden ja turvallisuuden vaatimus. Perusinfrastruktuurihankkeet ja järjestelmäinvestoinnit suoritetaan keskimääräistä pidempiaikaisella elinkaarimallilla,

joten tiedonsiirron toteuttamiseen käytettäviltä komponenteilta ja teknologia-rajapinnoilta edellytetään samoin jopa useiden kymmenien vuosien käyttöikää.

Operaattoreiden verkot ovat niin laajoja ja monimutkaisia, että niiden täytyy miettiä huolellisesti, mihin suuntaan ne kehittävät verkkojaan. Monen eri siirtolaiteteknologian käyttäminen samassa verkossa saa aikaan ylimääräisiä kuluja hallittavuuden kustannuksella. Tavoitteena on käyttää mahdollisimman monipuolista ja pitkäikäistä tekniikkaa, minimoiden kuluja ja laitteiden lukumäärää verkossa. Verkon tulee olla suorituskykyinen, luotettava, helposti hallittava ja valvottava, sekä laajennettavissa tarpeiden mukaan muutokset minimoiden. Erikoisratkaisuja tarjoavissa verkoissa yhdestä pisteestä verkkoon liittyvien laitteiden määrä on usein pieni, jolloin sijoituspaikan liittäminen verkon solmukohtaan on melko kallista.

Operaattorit ovat jo kauan halunneet siirtyä piirikytkentäisistä verkoista pakettikytkentäisiin verkkoihin. Pakettiverkot tarjoavat enemmän kapasiteettia, mahdollistavat kapasiteetin ylityksen toisin kuin piirikytkentäiset verkot ja tekevät kaiken vielä edullisemmin. Merkittävin haaste on ollut piirikytkentäisten verkkojen ominaisuus toimia verkon laajuisesti synkronisesti ja tarjota synkronointia myös asiakaslaitteille, mihin luonteeltaan asynkronisen pakettiverkon on ollut vaikeata mukautua. Nykyisin tähän ongelmaan löytyy jo useita ratkaisumalleja, mutta mikään niistä ei ole vielä muodostunut selkeäksi markkinajohtajaksi.

Piirikytkentäisiin verkkoihin suunnitellut sarjaliikennepalvelut eivät aina kuitenkaan toimi hyvin jaetussa infrastruktuurissa. Hitaita sarjaliikennesyhteysyksiä ovat tämän työn näkökulmasta asynkroniset ja synkroniset sarjaliikennesyhteysydet nopeuteen 64 kbps asti, sekä digitaalisen hierarkian nopeudet 64 kilobitistä kahteen megabittiin sekunnissa.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutustua tekniikoihin ja laitteisiin, joilla hitaat piirikytkentäiset sarjaliikennesyhteysydet voidaan toteuttaa pakettipohjaisella siirtotekniikalla pitäen samalla huolta synkronoinnin onnistuneesta siirtämisestä verkon yli. Lisäksi pyritään selvittämään, minkälaisia laatuvaatimuksia pseudojohtoemulaatio aiheuttaa pakettiverkolle. Mittauksissa keskitytään bittivirheiden havainnointiin ja adaptiivisen kellonpalautuksen toimintaan viiveeltään vaihtelevassa verkkoympäristössä. Kahta käytettävissä olevaa kehystystapaa pyritään vertailemaan keskenään ja löytämään eroja häiriönsiedossa. Säädetävän viiveen tuottamiseksi rakennetaan emulaatiojärjestelmä, jonka toimintaa pyritään myös arvioimaan.

1.3 Diplomityön rakenne

Tämä diplomityö jakautuu kirjallisuustutkimukseen perustuvaan teoriaosaan ja testiverkossa suoritettuihin mittauksiin käsittelevään käytännön osaan. Teoriaosuuksien aluksi työn toisessa luvussa käydään läpi televerkkojen kehityshistoriaa ja nykyistä tapaa toteuttaa sarjaliikennesyhteysyksiä. Kolmas luku tutustuttaa eri sarjaliikenne-tyyppeihin. Neljäs luku esittelee perinteisten televerkkojen arkkitehtuureja ja synkronointimenetelmiä. Viidennessä luvussa tutustutaan yleiseen malliin piirikytkentäisten yhteyksien emuloimisesta pakettiverkoissa ja käydään läpi kolme vallitsevaa pseudojohtoemulaatiotekniikkaa yhtäläisyyksineen ja eroavaisuuksineen. Luvussa esitellään myös kolme tärkeintä standardointiorganisaatiota, jotka vaikuttavat piiri- ja pakettikytkentäisten verkkojen kehitykseen. Kuudes luku käy läpi emulaatiotekniikoista riippumattomia synkronointiratkaisuja pakettiverkoissa, jotka mahdollistavat aikajakoisesti kanavoitujen yhteyksien siirron luotettavasti pakettiverkoissa.

Käytännön osuuden aluksi luvussa seitsemän tutustutaan verkkojen parissa tehtävien mittausten teoriaan ja erilaisiin suorituskykymittareihin, sekä niiden soveltamiseen testiverkossa. Kahdeksas luku esittelee testiympäristössä käytetyt laitteet, ohjelmistot, verkkotopologiat ja listaa erilaiset testitapaukset. Yhdeksäs luku käy läpi mittauksista saadut tulokset ja havainnot sekä esittelee lopuksi yhden ratkaisumallin sarjaliikenneyhteysien toteuttamiseen pakettiverkoissa työssä käytetyin laittein. Kymmenennessä luvussa esitetään yhteenveto tehdystä työstä.

2 Verkkojen kehityshistoria ja konvergenssi

Teleoperaattorien kivijalka ovat aina olleet kiinteät puhelinlinjat. Vaikka dataverkoissa kulkevan liikenteen bittimäärä on moninkertainen puhelinliikenteeseen verrattuna, puhelinliikenteen kate per siirretty bitti on ollut ylivoimainen. Yksittäiset tilaajat on kytketty kuparikaapelipareilla alueelliseen keskukseen. Tästä verkon osasta käytetään nimitystä liityntäverkko ja se on toteutettu perinteisesti analogisella tekniikalla muodostaen tähtitopologian tilaajilta keskukseen. Samaa verkkoa on voitu hyödyntää myöhemmin datayhteyksien toteutukseen käyttäen ISDN (Integrated Services Digital Network)- ja DSL (Digital Subscriber Line)-tekniikoita kodin ja keskuksen välisen yhteyden digitalisointiin. Yrityskäyttöön myytyjen datayhteyksien perusyksikkö on ollut pitkään 2 megabitin kupariyhteys, joista on suurempien kapasiteettitarpeiden johdosta siirrytty enenevässä määrin 10 tai 100 megabitin Ethernet-yhteyksiin.

Keskuksset vuorostaan on kytketty toisiinsa nopeammilla yhteyksillä, joista käytetään nimitystä runkoverkko. Tässä osassa verkkoa oleellista on eri tilaajien kanavointi yhdelle suurinopeuksiselle linkille. Yksi puhelu kulkee pulssikoodimodulaatiotekniikalla (PCM) koodattuna 64 kilobitin sekuntinopeudella, joita kanavoidaan aikajakoisesti (Time Division Multiplexing, TDM) 30 kappaletta yhteen E1-kehukseen. E1 on digitaalisen hierarkian perusyksikkö 2 megabitin sekuntinopeudellaan ja sitä käytetään paljon myös puhtaaseen datasiirtoon. E1 käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.1.

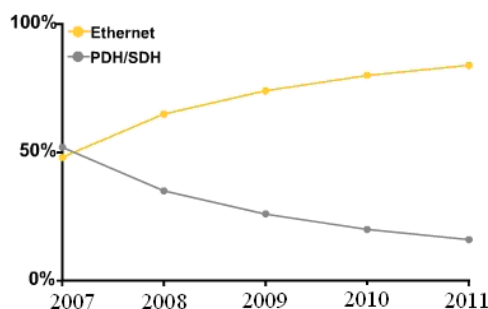
Kehyksiä siirrettiin aluksi PDH- (Plesynkroninen Digitaalinen Hierarkia) ja myöhemmin SDH-tekniikalla (Synkroninen Digitaalinen Hierarkia). Nykyisin runkoyhteydet on jo toteutettu pääosin huippunopein valokaapeliyhteyksin käyttäen DWDM-tekniikkaa (Dense Wavelength-Division Multiplexing) ja yhteyspisteitä, joihin voidaan tuoda kaikenlaista liikennettä eri tekniikoita käyttäen. [1]

Matkapuhelinverkkojen synnyn myötä E1 muodostui myös standardiliitännätavaksi liittää yksittäinen GSM-verkon tukiasema tukiasemaohjaimeen. PDH mahdollistaa kellosignaalin siirtämisen keskukselta yksittäisille tukiasemille pitäen verkon solmut synkronoituna yhteiseen kelloon. Maailmassa arvellaan olevan yli 2 miljoonaa tukiasemaa (2007), joista yhä yli 70% runkoyhteys on toteutettu PDH-teknologialla. Suomen kaltaisissa harvaan asutuissa maissa haja-asutusalueilla yhteystekniikkana on useimmiten PDH-pohjainen mikroaaltolinkki, joilla tukiasemat ketjutetaan. Kuparikaapelien asennus tulee kyseeseen lähinnä kaupunkialueilla, joissa yhteysmatkat ovat lyhyemmät.

Infonetics tutkimuslaitoksen mukaan edelleen maailmanlaajuisesti uusasennuksista 65% on toteutettu PDH-pohjaisilla mikroaaltolinkeillä. Syinä tähän voidaan pitää PDH:n luotettavaa mainetta palvelunlaadun suhteen ja kykyä toteuttaa synkronointi luotettavasti. Radiolinkkejä käyttämällä voidaan välttää paikallisoperaattoreille maksettavat kuukausivuokrat kuparipareista. Ethernetin osuus asennuksista on vielä vaivainen 15 %, mikä tulee pitkälti uusimpien 3,5G tukiasemien asennuksista, joissa on valmiina Ethernet-liitäntä ja tarve suuremmille bittinopeuksille. Suomessa Ethernetin osuus uusasennuksista lienee kuitenkin jo lähellä sataa uusien tukiasemien vaatiessa kymmenien megabittien runkoyhteyksiä. Ethernet-tekniikka tulee yleistymään koko ajan, kun runkoyhteyksiltä vaaditaan yhä enemmän kapasiteettia nopeasti suositaan kasvattavien mobiilidatayhteyksien myötä. [2]

Ericssonin omien tutkimusten mukaan mobiilidatan määrä ohitti puheen osuuden heidän laitteitaan käyttävissä HSPA-verkoissa (High Speed Packet Access) jo vuonna 2007 [3]. Liityntäverkon muutos on selvästi nähtävissä Infoneticsin uudemmassa

raportissa mikroaaltolinkeistä saatavista tuloista, jossa Ethernet-pohjaiset linkit ovat ohittaneet TDM-pohjaiset [4]. Muutos on havainnollistettu kuvassa 1.



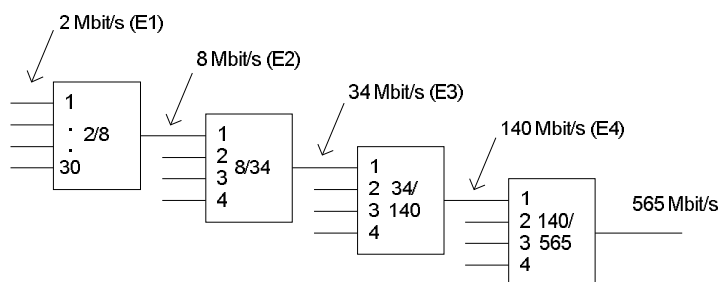
Kuva 1 Mikroaaltolinkkien markkinaosuudet maailmanlaajuisesti liikevaihdon mukaan [4]

Siirtymävaiheessa tarjolla on linkkiratkaisuja, joista löytyy molemmat yhteystavat rinnakkain, jolloin puhe voidaan edelleen siirtää TDM-verkon yli datan kulkiessa pakettiverkossa [3]. Uusimmat matkapuhelinverkkotekniikat ovat runkoverkoltaan puhtaasti pakettipohjaisia, jolloin piirikytkentäisten yhteyksien tarve katoaa vähitellen GSM-verkon poistuessa käytöstä. Muissa sovelluksissa näitä yhteyksiä saatetaan tarvita kuitenkin vielä kauemmin.

2.1 Operaattorin haasteet usean verkkoalustan ympäristössä

Edellisessä luvussa mainituista seikoista johtuen verkkoyhteyksiä tarjoaville yrityksille on muodostunut verkkoinfrastruktuuri, joka koostuu usean sukupolven tekniikoista, joita käytetään verkossa rinnakkain. Piirikytkentäiset PDH- ja SDH-verkot vaativat omat hallintajärjestelmänsä ja IP-pohjaiset ratkaisut omansa. Liityntärajapinnoilla voidaan lisäksi joutua käyttämään erinäisiä mediamuuntimia. Seurauksena tästä on verkon kokonaishallittavuuden heikentyminen. Siitä vuorostaan syntyy ylimääräisiä operatiivisia kuluja (Operational Expenditure, OPEX). Monen eri verkkoteknologian käyttö samalla yhteydellä johtaa myös tilanteeseen, jossa tietoa täytyy kehystää yhä uudelleen eri verkkoteknologioita varten, mikä laskee hyötybittien suhteellista määrää. Samalla laitteilta vaaditaan useita eri liityntärajapintoja, mikä lisää kustannuksia.

PDH-järjestelmä on kehitetty alun perin piirikytkentäisen puhelinverkon tarpeisiin, minkä johdosta sen käyttö datayhteyksiin on kankeaa. Hierarkia sallii vain tietyt bittinopeudet kuvan 2 mukaisesti. E1-yhteyksiä voidaan kanavoida digitaalisen hierarkian 8, 34 ja 140 megabitin nopeuksiksi yhdistämällä neljä alemman tason yhteyttä. Nämä luokat eivät välttämättä vastaa käyttötarpeita, joten yhteyden hyötysuhde voi jäädä matalaksi. Hallinta- ja ohjausaikaväleistä johtuen nopeuden kasvu ei ole suoraan edellisen tason nelikerta [1].



Kuva 2 PDH-hierarkian kanavointi eurooppalaisen standardin mukaan

Esimerkiksi yhden E1- ja yhden 10 megabitin Ethernet-yhteyden tarjoaminen PDH-runkoverkolla vaatii 34 megabitin järjestelmän! Yhden E1-signaalin erottaminen suuremmasta virrasta aiheuttaa tarpeen purkaa koko hierarkia alimmalle portaalle asti. Suurempia nopeuksia käytettäessä verkkoon tarvitaan hyvin monta kanavointilaitetta sijaintipaikkaa kohden, jotka muodostavat kulujen lisäksi mahdollisia vikapisteitä [1]. Päästä-päähän polun luominen ei onnistu, kuten SDH:ssa eikä järjestelmässä ole samanlaisia automaattisia toipumisominaisuuksia vikatilanteiden varalta. PDH-laitteisto alkaa olla elinkaarensa loppupäässä eikä se vastaa enää nykyajan vaatimuksia kaikilta osiltaan. Se on kuitenkin edelleen laajalti käytössä erityisesti luotettavuutensa ja fyysisen tason synkronointiominaisuuksien vuoksi.

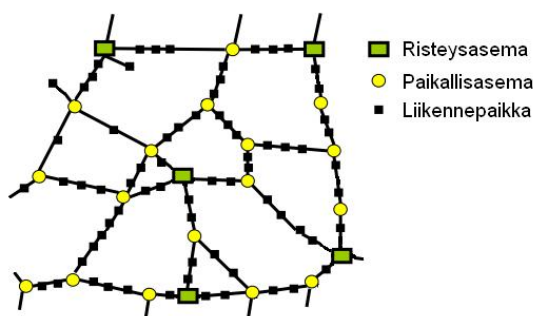
PDH-verkko on tosiasiaa vain summittaisesti synkronoitu, mistä tulee nimi plesiochroninen. Siirtolaitteiden kellot ovat toisistaan riippumattomia. Verkko sietää tiettyyn rajaan asti asynkronisuutta, jota korjataan kanavointilaitteissa tasausbiteillä. PDH-laitteketjun yli kuljetettu 2,048 Mbit/s signaali säilyttää kuitenkin alkuperäisen tarkkuutensa ja on siten johdettavissa referenssikelloon, vaikka kanavointivaiheessa sitä kuljettava signaali onkin asynkroninen. Tämä "läpinäkyvyys" on erittäin merkittävä ominaisuus, joka mahdollistaa esimerkiksi puhelinvaihteiden synkronoinnin asynkronisen PDH-siirtoverkon yli. [5]

Mikäli on tarpeen taata koko verkon laajuinen tarkka synkronointi, täytyy käyttää SDH-laitteistoa. SDH-verkon fyysinen rakenne tarjoaa nopean toipumisajan vikatilanteissa ja itse laitteiden mekaaninen kestävyys on todettu käytössä erittäin hyväksi. Laajan levinneisyyden johdosta se ei tule poistumaan verkoista vielä pitkään aikaan, vaan jatkaa elämäänsä siirtolaitteiden perustekniikkana, jonka päällä voidaan siirtää monia muita tekniikoita. Viime vuosina sitä on kehitetty paremmin Ethernet-yhteensopivaksi.

Edellä mainitut seikat tekevät PDH-järjestelmästä kalliin, joustamattoman ja epäkäytännöllisen. Moninainen laitekanta pakottaa ylläpitämään suurempaa varaosavarantoa, sekä vaatii henkilökunnalta laajempaa osaamista kokonaisuuden hallitsemiseksi. Laitevalmistajat luopuisivat mielellään vanhimpien tekniikoiden tukemisesta ja myisivät tilalle uusia laitteita. Se heijastuu suoraan myös vanhojen tekniikoiden varaosahinnoitteluun. Kaikki nämä seikat yhdessä muodostavat ylimääräisiä kustannuksia, joista pyritään eroon. Operaattoreiden tavoitteena on jo pidempään ollut yhden teknologia-alustan varaan rakentuva pakettipohjainen runkoverkko.

2.2 Nykyinen sarjaliikenteen toteutustapa siirtoverkon yli

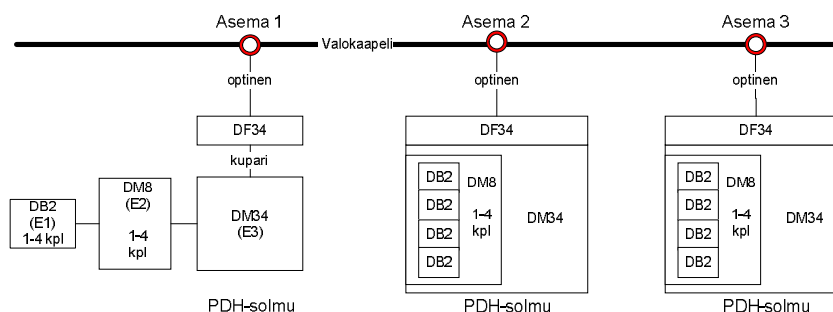
Tämän työn toimeksiantaja toimii vahvasti rautatieympäristössä, minkä johdosta runkoyhteydet kulkevat pääosin radanvarsia pitkin. Siitä seuraavia verkon erityispiirteitä ovat kalaverkkoomainen perustopologia, asemien sijainteja seuraavat ketjumaiset yhteysvälit ja rajallinen määrä varmistusreittejä. Asiakaslaitteet sijaitsevat yleensä liikennepaikoilla (tekniisiä tiloja) tai paikallisasemilla ja niistä kulkevat yhteydet päättyvät suuremmille risteysasemille, jotka on yhdistetty toisiinsa suuremmilla nopeuksilla. Verkko on tyypillisesti rakentunut rataosa kerrallaan, jolloin erilaisia ja ikäisiä ratkaisuja löytyy paljon. Kuvassa 3 on esitetty kuvitteellinen rautatieympäristön verkkotopologia.



Kuva 3 Tyypillinen verkkotopologia rautatieympäristössä

Tyypillisessä sarjaliikenneyhteyden toteutuksessa joukko tietoa syöttäviä laitteita on yhdistetty yhteiseen valvomoon risteusasemalla. Tällaisessa yhteydessä sarjakaapelin suositeltu maksimipituus 15 metriä tulee nopeasti vastaan ja yhteyden toteuttamiseksi täytyy kytkeytyä johonkin siirtojärjestelmään tai vetää sijaintipaikkojen välille modeemilinja. Sarjaliikenne sovitetaan tyypillisesti ensin 64 kilobitin aikaväliin PCM-järjestelmässä esimerkiksi ITU:n V.110 suosituksen [6] mukaisesti täyttämällä kehyksen tyhjä tila täytebiteillä. Näitä vuorostaan kanavoidaan PDH:n E1-kehykseksi. E1-kehysrakenne voidaan vielä tarpeen mukaan laittaa SDH-verkon STM-kehyksen (Synchronous Transfer Mode) sisälle. Vastaanottopäässä yhteys vastaavasti puretaan.

Kuvassa 4 on esitetty tyypillinen Nokian PDH-tekniikalla toteutettu yhteysväli, jossa laitteita sijaitsee joka liikennepaikalla ja ne ovat yhteydessä toisiinsa kuidulla. Vasemmalla on eritelty PDH-kehikon eri kortit Nokian tuotenimillä. Tässä tapauksessa runkoverkon nopeus on E3-tason 34 megabittiä sekunnissa ja joka asemavälillä on käytössä yksi kuitupari.



Kuva 4 Siirtoverkkototeutus sarjaliikennelaitteiden verkottamiseen Nokian PDH-laitteistolla

DB2-kortti haaroittaa E1-tason signaalin useiksi 64 kilobitin signaaleiksi erilaisille liitântäkorteille, jotka on jätetty pois kuvasta. Näitä voivat olla esimerkiksi synkroniset ja asynkroniset sarjaliikenneyhteydet eri nopeuksilla, ISDN-yhteydet, puhekanavat, faksiyhteydet, televerkon signalointiyhteydet yms. Suurempia nopeuksia kohti siirryttäessä käytetään hierarkkista 4:1 kanavointiperiaatetta, joka esiteltiin edellisessä luvussa.

DF34 on muunninlaite, joka tekee sähköisestä 34 megabitin signaalista optisen. Sillä voidaan kasvattaa siirtoetäisyyksiä huomattavasti ja samalla signaalista saadaan vähemmän häiriöherkkä. Samalla perusrakenteella voidaan siirtää kaikkia digitaalisen hierarkian perusnopeuksia, mutta järjestelmän kokonaiskapasiteetti jää 34 megabittiin sekunnissa. Se alkaa olla nykyisin rajoite, mikäli samalla sijaintipaikalla tarvitaan paljon datayhteyksiä.

3 Sarjamuotoinen tiedonsiirto

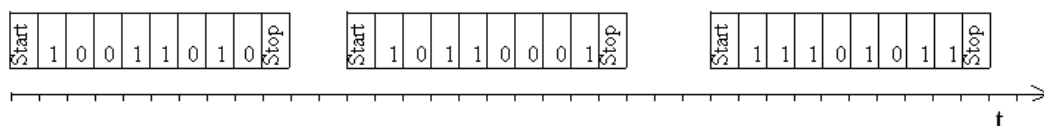
Sarjamuotoinen tiedonsiirto tarkoittaa tapaa siirtää tietoa yhtä linjaa käyttäen yksi symboli kerrallaan. Vaihtoehtoinen tapa on rinnakkaismuotoinen siirto, jossa sarjalinjoja on useita rinnakkain kahden pisteen välillä. Kapasiteetti on tällöin suurempi, mutta johtimia tarvitaan myös enemmän. Kehitys on mennyt rinnakkaisväylistä yhä enemmän kohti sarjaväyliä nopeuksien noustessa. Sarjamuotoista tiedonsiirtoa käyttävät verkot voidaan edelleen jakaa tietokoneiden välisissä hitaissa yhteyksissä käytettyihin sarjaväyliin, sekä siirtolaitteiden välissä käytettyihin nopeampiin aikajakoista kanavointia (Time Division Multiplexing, TDM) käyttäviin järjestelmiin. Tämän työn kannalta tärkein sarjaväylä on RS-232 ja kanavointijärjestelmistä PDH E1-kehysrakenteella. Nämä käydään läpi tässä luvussa.

3.1 Asynkroninen ja synkroninen sarjaliikenneväylä

Tässä luvussa tutustutaan tarkemmin tapoihin siirtää tietoa sarjaväylässä synkronisesti (tahdistetusti) ja asynkronisesti (tahdistamatta). Asynkronisessa tiedonsiirrossa tietoa lähetetään lähetyspään haluamalla hetkellä ja lähetyksessä voi olla välillä taukoja. Synkroninen tiedonsiirto perustuu jatkuvaan tavuvirtaan, joka on ajallisesti tahdistettu vakionopeuteen erillisellä synkronointisignaalilla.

Asynkronisessa siirrossa ensin lähetetään aloitusbitti, joka kertoo vastaanottajalle siirron alkamisesta. Vastaanottaja tahdistuu lähetykseen aloitusbitin perusteella. Heti perään lähetetään itse databitit ja lopuksi lopetusbitti. Datan joukossa on mahdollista lähettää myös pariteettibitti virheiden havaitsemiseksi.

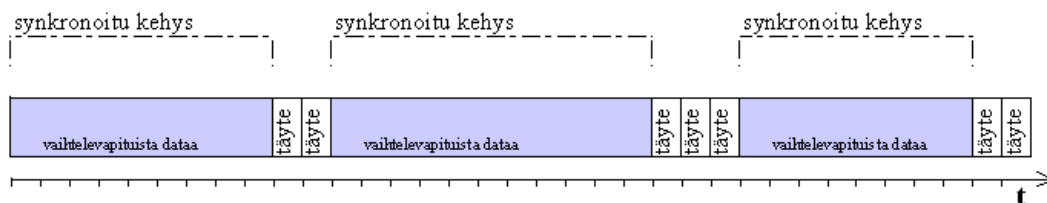
Aloitus- ja lopetusbitti muodostavat yhden kehyksen, joka on aina vakiomittainen. Kehyksen mittana ilmoitetaan esimerkiksi 8N1, mikä tarkoittaa, että käytössä on 8 databittä, ei pariteettibittä ja yksi lopetusbitti. Kehyksessä siirretään yleensä yksi merkki, sillä 8 bitillä voi esittää 256 eri arvoa, mikä vastaa tyypillistä merkistön koodausta. Kehysten ajallinen välimatka toisistaan voi vaihdella kesken lähetyksen kuvan 5 esittämällä tavalla. Tyypillisessä tietokoneessa asynkroninen siirto hoidetaan UART-piirin (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) avulla käyttäen RS-232 liitäntää. [7]



Kuva 5 Kehysten välinen aikaero vaihtelee asynkronisessa tiedonsiirrossa

Synkronisessa siirrossa peräkkäisten tavujen ajallinen välimatka pysyy aina samana, toisin kuin asynkronisessa siirrossa. Synkroninen tiedonsiirto vaatii aikasignaalin lähetystä, jotta lähettäjä ja vastaanottaja pysyvät samassa tahdissa ja vastaanottaja osaa lukea bitin oikeasta kohdasta. Tarve synkronoinnille on lähtenyt halusta lähettää luotettavasti suurempia bittinopeuksia kuin asynkronisesti oli mahdollista. Aikasignaalin taajuus on sama kuin vastaavan lähettävän tai vastaanottavan linjan bittinopeus [8]. Mikäli linjalla ei ole mitään lähetettävää, käytetään täytebittijä täyttämään tyhjä tila kehyksessä. Periaate on esitetty kuvassa 6. Tietokoneissa synkroninen sarjamuotoinen siirto on käytössä lähinnä erikoisratkaisuihin, minkä

johdosta liitäntäkortit ovat huomattavasti kalliimpia kuin asynkronisessa tapauksessa. Synkronisen siirron toteuttavaa piiriä kutsutaan nimellä USRT (Universal Synchronous Receiver/Transmitter). Tyypillisiä synkronisia sarjaliikenneprotokollia ovat HDLC, SDLC, Frame Relay ja X.25.



Kuva 6 Synkronisessa tiedonsiirrossa kehysten välinen aika täytetään täytebiteillä

3.1.1 Sarjaliitäntä RS-232

Yleisin sarjaliikenneväylien liitäntätyyppi on RS-232. Viralliselta nimeltään se on EIA/TIA-232 standardin luoneen organisaation mukaan nimettynä. ITU-T on määritellyt vastaavan liitännän tunnuksilla V.24 ja V.28, sekä ISO tunnuksella ISO-2110. RS-232 liitännän tietomuoto (bittimäärät) on esitetty taulukossa 1. [7]

Taulukko 1 RS-232 liitännän tietomuoto (bittejä)

Aloitusbittejä	Databittejä	Pariteettibitti	Lopetusbittejä
1	5,6,7 tai 8	Ei, parillinen, pariton, SPACE tai MARK	1, 1.5 tai 2

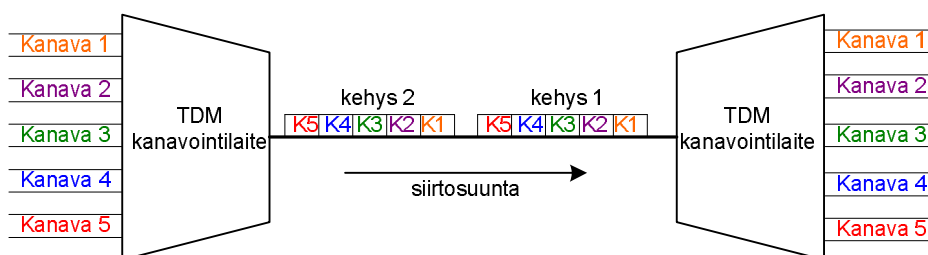
Standardi määrittelee liitännän sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet, sekä käytettävät liitäntäsignaalit ja niihin liittyvät nastat. OSI-mallissa (Open Service Interconnection) se sijoittuu fyysiselle kerrokselle tasolle 1. Liitäntä on alkujaan tarkoitettu päätelaitteen (DTE) ja verkkopäätteen (DCE) yhdistämiseen toisiinsa enintään 15 metrin etäisyyksillä. Tietokone on esimerkki päätelaitteesta ja modeemi vastaavasti verkkopäätteestä. Päätelaitteessa käytetään standardin mukaan urosliitintä ja verkkopäätteessä naarasliitintä. Liitännästä on monta versiota, joista yleisin on RS-232C käytettäessä DB9-liitintä ja RS-232D käytettäessä RJ45-liitintä. [9]

Standardi määrittelee 25 eri sähköistä signaalia. Signaalit voidaan jakaa datalinjoihin, hallintalinjoihin, ajoituslinjoihin ja toissijaisiin erikoistoimintoihin. Mikäli kaikki ovat käytössä, on liittimenä tyypillisesti 25-nastainen DB-25. Useimmissa sovelluksissa riittää kuitenkin 8 signaalia, jolloin käytetään pienempää 9-nastaista DB-9-liitintä. Liittimissä on toisistaan poikkeavat nastanumeroinnit. Teollisuusstandardiksi liittimistä valikoitui DB-9, jota IBM käytti tietokoneissaan. Se sopii kokonsa puolesta paremmin pieniin laitteisiin kuin DB-25. Siirtojärjestelmistä löytyvät hitaan sarjaliikenteen liitännät ovat yleensä tyyppiä DB-25, RJ45 tai 36-napainen V.35. [9]

Suuremmilla bittinopeuksilla tarvitaan yleensä synkronointia, jolloin on otettava käyttöön enemmän nastoja. Tällöin liitin on tyypillisesti DB-25. Erityisen tärkeitä ovat nastat 15 ja 17, joita käytetään kellosignaalin lähettämiseen DCE:ltä DTE:lle. Näiden avulla liitäntä kellottaa lähettävät ja vastaanottavat piirinsä. Mikäli DTE toimii pääkellona, käytetään nastaa 24 lähettämään signaali DCE:lle. Standardi ei kerro, miten synkronointi varsinaisesti tapahtuu tai minkälaisia laatuvaatimuksia sillä on. Tekniikka on ehtinyt 40-vuoden ikään, joten kirjallisia lähteitäkään synkronoinnille ei löytynyt sen vähäisestä käytöstä johtuen. [8]

3.2 Aikajakoinen kanavointi

Luvussa 2 tutustuttiin jo lyhyesti aikajakoiseen kanavointiin puhelinverkoissa. Nimitys tulee tavasta siirtää sarjaliikennelinkillä vakiomittaisia kehyksiä, jotka on jaettu edelleen aikaväleihin. Hyötykuorma kulkee yksittäisissä aikaväleissä. Kanavointilaite huolehtii eri kanavista tulevan tiedon sovittamisesta aikaväleihin vuorotellen ja vastaavasti kanavoinnin purusta yhteyden vastapäässä kuvan 7 mukaisesti. Yksittäiselle yhteydelle on varattu yksi aikaväli. Kehysrakenne käydään tarkemmin läpi aliluvussa 3.2.1.

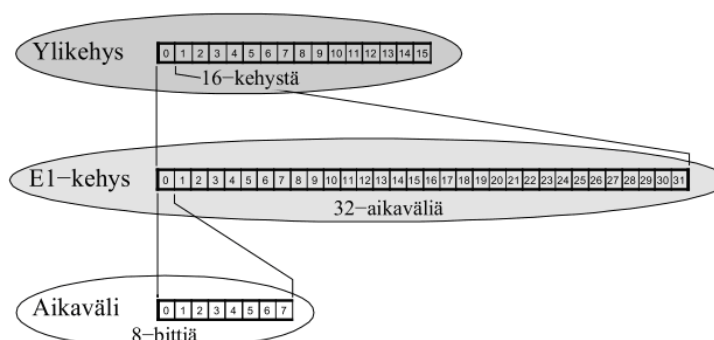


Kuva 7 Aikajakaisen kanavoinnin periaate

TDM-järjestelmät ovat lähtökohtaisesti häviöttömiä ja viiveessä ei esiinny vaihteluita. Viiveen määrittää lähinnä maantieteellisestä etäisyydestä syntyvä etenemisviive. TDM datassa voi esiintyä bittivirheitä, mutta bittien järjestys ei koskaan muutu eikä niitä häviä matkalla. Näiltä osin piirikytkentäisen verkon ominaispiirteet ovat hyvin erilaiset kuin pakettiverkoilla, eivätkä ne ole helposti toistettavissa. Pakettiverkkojen haasteita käsitellään tarkemmin luvussa 6.1.[10]

3.2.1 E1-kehysrakenne

Kirjallisuudessa aikajakaisesti kanavoidusta kehysrakenteesta käytetään vaihtelevasti nimityksiä E1-kehys, PCM-kehys tai TDM-kehys. Jokaisen aikavälin koko on PCM-koodauksesta periytyvä 8 bittiä eli yksi tavu. Yhden kehyksen mitta on siten $32 \cdot 8$ bittiä eli 256 bittiä (32 tavua). Ylikehykset koostuvat 16 peräkkäisestä kehyksestä ja ne mahdollistavat aikavälin 16 käytön kanavakohtaiseen merkinantoon. Kolmitasoinen hierarkia on esitetty kuvassa 8. [11]



Kuva 8 E1-kehysrakenteen eri tasot [11]

Kaikki aikavälit lähetetään vaikka ne eivät olisi käytössä, jotta voidaan varmistua kehyksen synkronoinnin säilymisestä. Tyhjät aikavälit täytetään tällöin täytebiteillä. Aikaväli nolla on varattu synkronointi- ja hälytystiedon välittämiseen. Synkronointibitit

ovat aina parillisissa ja hälytystietobitit parittomissa kehyksissä.

Synkronointisignaalista käytetään nimitystä kehyslukitusignaali (Frame Alignment Signal, FAS) ja se täyttää aikavälistä 0 bitit 1-7 ollen aina muotoa 0011011. FAS näyttää, missä kulkee kahden aikavälin raja. Aikaväliä 16 voidaan käyttää kanavakohtaiseen merkinantoon tai normaalin datan lähettämiseen. Perinteisissä puhelinjärjestelmissä voidaan siten välittää 30 puhelua yhdessä TDM-kehyksessä.

Näytteitä otetaan puhelinjärjestelmissä Nyqvistin teoreemaan perustuen 8000 kertaa sekunnissa, mikä on myös E1-kehysten lukumäärä sekuntia kohden TDM-kanavointijärjestelmissä. Yhden kehyksen ajallinen pituus on siten 125 mikrosekuntia. Yhden aikavälin bittinopeudeksi tulee $8000 \text{ Hz} \cdot 8 \text{ bittiä} = 64 \text{ kilobittiä sekunnissa}$. E1-linjan nimellisoikeus on täten 2048 kilobittiä sekunnissa. Kehysrakenne on esitetty kuvassa 9.

Kehys	Aikavälit														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...	15	16	17	...	31
1	Alarm	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	...	8 b	CAS	8 b	...	8 b
2	Sync	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	...	8 b	CAS	8 b	...	8 b
3	Alarm	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	...	8 b	CAS	8 b	...	8 b
...
8000	Sync	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	8 b	...	8 b	CAS	8 b	...	8 b

Kuva 9 E1-kehysrakenne

4 Televerkon arkkitehtuurit ja synkronointi

Televerkon aikakriittiset palvelut tarvitsevat synkronointia nopeaan ja luotettavaan tiedonsiirtoon pitkillä välimatkoilla. Se on tärkeää, jotta voidaan välttää puskurien yli- ja alivuodot, bittivirheet ja muut haittavaikutukset, joita vastaanottopäässä voi tapahtua. Synkronointi pitää signaalin vaihevaihtelun sallituissa rajoissa ehkäisten näin virheiden syntyä. Verkkoarkkitehtuureja on erilaisia ja niiden synkronoinnin taso vaihtelee. Verkkoarkkitehtuureja voidaan ryhmitellä synkronoinnin suhteen useilla eri tavoilla.

Tyypillisiä arkkitehtuureja ovat synkroninen, asynkroninen, pseudo-synkroninen ja plesiokroninen verkko. Tämän työn kannalta tärkein niistä on synkroninen verkko, joka käsitellään muita laajemmin.

Asynkronisessa verkossa on useita kellosignaalin lähteitä, eikä kaikilla kelloilla ole samaa pitkän aikavälin tarkkuutta. Verkkoelementit eivät vaihda synkronointitietoa keskenään vaan ne toimivat itsenäisesti oman kellon varassa. Asynkroninen sarjaliikenneväylä RS-232 noudattaa tätä periaatetta.

Pseudo-synkronisissa verkoissa kaikilla verkkoelementeillä ei ole samaa referenssisignaalin lähdettä, mutta tarkkuus on samaa tasoa. Verkkoelementit vaativat yhteyden synkronoinnin lähteeseen, mutta ne eivät vaihda synkronointitietoa keskenään.

Plesiokronisessa verkossa verkon eri osat eivät ole täysin synkronisoitu keskenään. Elementeille sallitaan tietyn rajan sisällä pysyvää asynkronisuutta, mistä seuraa ajoittaisia luiskahduksia. Siitä tulee nimitys "melkein synkroninen". PDH-järjestelmä noudattaa tätä periaatetta. Tyypillisesti eri maiden väliset verkot ovat luonteeltaan plesiokronisia maiden sisäisten verkkojen ollessa synkronisia. [5]

4.1 Synkroniset verkot

Synkronisessa verkossa kaikilla kelloilla on identtinen pitkän aikavälin tarkkuus. Verkko-operaattori ylläpitää kellosignaalia jakavaa verkkoa, joka on yhteydessä valtakunnalliseen primäärikelloon (Primary Reference Clock, PRC). Verkossa on yksi aktiivinen PRC, josta kellosignaali jaetaan linjaa pitkin kaikille verkkoelementeille. Laitteet muodostavat tyypillisesti puumaisen hierarkian, jossa kellojen tarkkuus heikkenee alempia tasoja kohti. Kellosynkronointihierarkiat käsitellään tarkemmin luvussa 4.3.

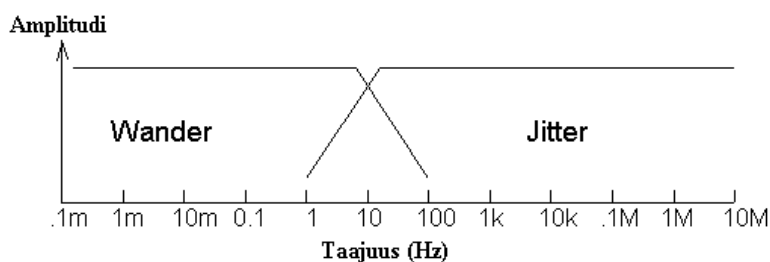
Synkronointi voi tapahtua sekä taajuuden, että ajan suhteen. Toisen ja kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot vaativat taajuussynkronointia johtuen siirtosuuntien jaosta eri taajuuskaistoilla. Klassinen esimerkki synkronoinnin tarpeesta on matkapuhelimen siirtyminen yhden tukiaseman alueelta toiselle. Puhelin odottaa löytävänsä kantoaallon tietyltä nimellistaajuudelta. Mikäli taajuus on kuitenkin vaeltanut raja-arvojen ulkopuolelle, ei puhelin löydä sitä. Siitä seuraa puhelun katkeaminen johtuen siitä, että puhelin on päästänyt irti aiemmasta taajuudesta siirtymävaiheessa.

Televisiolähetyksissä käytetyt DVB-tekniikat (Digital Video Broadcasting) sitä vastoin perustuvat aikasyntronointiin. Tällöin on oleellista, että kaikilla laitteilla on sama kellonaika. Seuraavan sukupolven LTE-matkapuhelinverkot (Long Term Evolution) hyödyntävät molempia tapoja [10].

Viestintävirasto on määrittänyt Suomessa noudatettavat synkronointivaatimukset määräyksessä 26 ja se tarjoaa oppaan niiden toteutukseen dokumentissa GFI 9501, joka on johdettu ITU:n suosituksista. [12]

4.2 Signaalin vaihevaihtelu liitántärajapinnoissa

ITU:n suositus G.823 asettaa rajat-arvot signaalin vaihevaihtelun määrälle liitántärajapinnoissa. Selkeyden vuoksi tässä työssä käytetään ilmiöistä pääasiassa alkuperäiskielisiä nimityksiä jitter ja wander. Joskus käytettyjä suomennuksia niille ovat esimerkiksi värinä ja vaellus, mutta yksiselitteistä termistöä ei ole. Määritelmän mukaan wanderilla tarkoitetaan pitkän aikavälin hidasta, alla 10 Hz muutosta signaalin vaiheessa. Jitter puolestaan on yli 10 Hertzin taajuudella tapahtuvaa lyhyen aikavälin muutosta [13]. Raja on kuitenkin häilyvä. Eroa taajuusalueessa on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10 Jitter ja Wander taajuusalueessa määriteltynä

Jitteria sisältävän kellon pulssien välinen aikaero ei ole vakio, vaan niiden välillä esiintyy tyypillisesti nanosekuntiluokan vaihteluita. Määritelmän mukaan kahden pulssin välinen aikaero (Unit Interval, UI) 2048 kbit/s nopeudella tulisi olla 488 ns [13]. Jitterin seurauksena voi olla kehysynkronoinnin katoaminen. [5]

Wander on tyypiltään kumulatiivista ja suuri wanderin määrä saa lopulta aikaan luiskahduksia verkossa. Suosituksissa annetut arvot ovat koko verkon läpi, jolloin yksittäinen linkki voi kuluttaa vain osan siitä. Jokainen verkkoelementti lisää kohinaa ja siten wanderin määrää loppupäässä. Jitterin ja wanderin mittaamiseen tutustutaan mittaamisen teoriaa käsittelevässä luvussa 7.7.

Luiskahduksella tarkoitetaan tilannetta, jossa lähettäjän ja vastaanottajan kellojen välille syntyy ajastuseroa toisen toimiessa liian hitaasti tai nopeasti suhteessa toiseen. Se saa vastaanottajan tuhoamaan tai toistamaan informaatiota. Puhekanavalla seurauksena on korvin kuultava napsahdus.

Suositus G.823 antaa PDH-liikennöintiä kiinteän maksimitaajuusero-arvon ± 50 ppm nopeusluokalle 2048 kbit/s [14]. Muutos minuuttia kohden saa olla enintään 1 ppm. Käytettäessä PDH-liitettä synkronointiin, ovat laatuvaatimukset tiukemmat kuin liikennöinnissä [14]. GSM-standardi sisältää tuhatkertaisen vaatimuksen ± 50 ppb [15]. UMTS-standardi asettaa vielä kovemman rajan 16 ppb [16]. Jotta vaatimukset voidaan täyttää, täytyy referenssisignaalin pysyä vaiheeltaan stabiilina ja taajuudeltaan tarkkana. Laitteiden oskillaattoreilla on suuri merkitys saavutettavaan suorituskykyyn.

4.3 Kellosynkronointihierarkiat

Standardointijärjestöt ovat määritelleet vaatimuksia televerkkojen synkronoinnissa käytetyille kelloille. Kuten SDH/SONET verkkoarkkitehtuureissa, myös kellosynkronointihierarkioissa on käytössä kansainväliset ITU:n ja pohjoisamerikkalaiset ANSI:n määritelmät. Hierarkiat perustuvat yleensä puumaiseen master-slave malliin. Laittevalmistajat käyttävät useimmiten amerikkalaisia termejä, sillä

ne ovat nimityksiltään yksiselitteisempiä kuin kansainväliset vastineet. Siksi on syytä tuntea molemmat termit ja niiden vastaavuudet.

ANSI:n määrittelemässä hierarkiassa stratum-tasoilla kuvataan kellojen hierarkiaa, jossa alemman tason kello voi johtaa aikasignaalin ylemmän tason kelloilta. Tasot on numeroitu yhdestä neljään, joista taso yksi on tarkkuudeltaan paras. Samasta termistä huolimatta NTP:n (Network Time Protocol) stratum-tasot eivät ole verrannollisia tässä käsiteltyihin tasoihin. Kellosignaalia levitetään hierarkian tasojen välillä jakeluverkkoa pitkin, mikä voi hyödyntää siirtoverkkoa toiminnassaan. Hierarkia on aina puumainen eikä siinä saa esiintyä silmukoita.

Hierarkian huipulla oleva Stratum 1 tason kello on täysin autonominen ajastuksen lähde, jolla ei ole mitään muuta lähdettä kuin mahdollinen kalibrointi. Ajan lähteenä voidaan käyttää atomikelloa. Se täyttää ANSI T1.101-standardin määritelmän primääristä referenssilähteestä (PRS) [17]. ITU:n vastaavan tarkkuuden suositus on G.811, jossa kellosta käytetään nimitystä PRC (Primary Reference Clock) [17]. Stratum 1 kello voi kontrolloida kaikkia alemman tason kelloja.

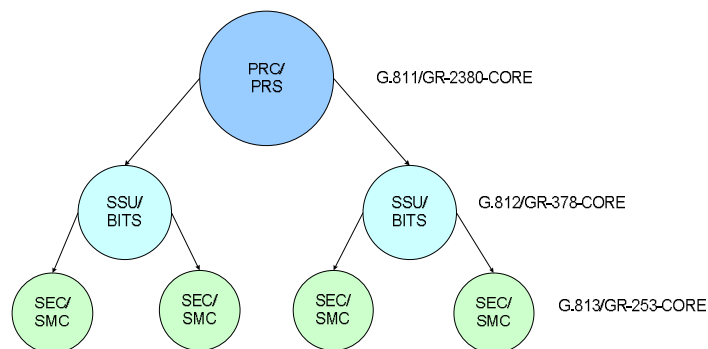
Satelliitista tulevaa GPS-signaalia (Global Positionin System) voidaan käyttää tarkkuudeltaan hyvänä ja edullisena tason 1 signaalin lähteenä, sillä se seuraa UTC-järjestelmän (Coordinated Universal Time) aikaa, joka perustuu atomikelloihin. Järjestelmä ei ole varsinaisesti autonominen, mutta vaadittu tarkkuus on sama $1,0 \times 10^{-11}$ [18]. Suomalaiset Viestintäviraston määräykset eivät kuitenkaan anna mahdollisuutta käyttää GPS:ä pääasiallisena kellona, sillä PRC-kellon tulee olla kansallinen. Kansallisen PRC-tason kellon toimittaa kaikille operaattoreille TeliaSonera Finland [12].

Stratum 2 tason kello seuraa lähdesignaalia normaaliolosuhteissa. Mikäli yhteyttä referenssikelloon ei ole, se ylläpitää parasta arviota ajasta itsenäisesti. Tyypillisiä tason 2 kelloja ovat rubidiumkellot ja OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator). Näitä kelloja sijaitsee tyypillisesti suurissa liikenteen keskuspaikoissa. Niistä käytetään amerikkalaista nimitystä BITS (Building Integrated Timing System). ITU:n vastine suosituksessa G.812 on nimeltään SSU (Sync Supply Unit) [19].

Stratum 3 tason kello ottaa signaalinsa toisesta kellosta, kuten Stratum 2, mutta sen oma tarkkuus on heikompi. Tämän tason kelloja on paikalliskeskuksissa ja SDH-solmuissa ja ne toteutetaan yleensä kristallioskillaattoreilla. Niistä käytetään yleisesti lyhennettä SEC (SDH Equipment Clock) [20]. Laatutaso ei aikoinaan riittänyt kaikkiin SDH/SONET-verkon elementteihin, joten siitä johdettiin Bellcore Labsin toimesta uudempi standardi Stratum 3E, jonka tarkkuus on parempi.

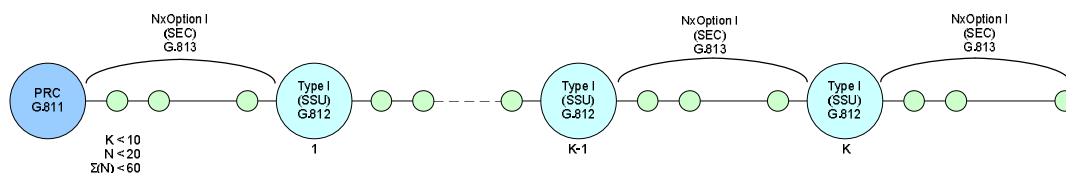
Stratum 4 tason kello on tarkoitettu käyttöön asiakaslaitteissa. Sitä ei suositella lähdekelloksi millekään muulle kellolle. Se ei osaa ylläpitää aikaansa menettäessään referenssisignaalin, vaan tällöin kello menee vapaasti juoksevaan tilaan. Stratum 4E on paranneltu versio edellisestä kuten kolmannen tason tapauksessa.

ITU:n suositukset vastaavat ANSI:n määritelmiä tasoilla 1-3, mutta ITU ei ole määritellyt neljättä tasoa. Vastaavuudet löytyvät liitteen 1 taulukosta. Suositukset Type II, III, IV, V ja VI ovat olemassa lähinnä yhteensopivuussyistä T1-hierarkian ja 1980-luvulla suunniteltujen laitteiden kanssa. Nykyisin laitteet tulisi suunnitella Type I ja Option 1 määritysten mukaisesti. ITU ja ANSI hierarkioiden vastaavuudet on esitetty kuvassa 11 kellojen nimityksien ja vastaavien standardidokumenttien kanssa. Ensin mainittu nimitys on ITU:n ja jälkimmäinen ANSI:n. ANSI määrittelyksiä on tarkennettu myöhemmin niin kutsutuilla Bell Core-dokumenteilla, jotka ovat muotoa GR-xxx-CORE. Kellon tarkkuus ja samalla hinta laskee hierarkiassa ylhäältä alas.



Kuva 11 SDH/SONET-verkon synkronointihierarkia ITU-T ja ANSI terminologialla esitettynä

ITU:n hierarkiassa primäärireferenssikelloa seuraavat G.812 mukaiset Type I -kellot, joita voidaan ketjuttaa alle 10 kappaletta. Kahden tällaisen kellon välissä voi olla enintään 20 kappaletta G.813 mukaista Option 1 -tyypin kelloja. Yhdessä synkronointiketjussa näitä voi olla alle 60 kappaletta. Käytännössä ketjun pituus tulisi pyrkiä minimoimaan. Esimerkkiketju on esitelty kuvassa 12. [12]

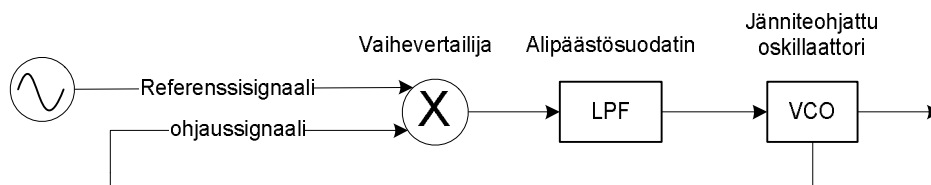


Kuva 12 Synkronointiverkon referenssiketju [21]

Olisi suositeltavaa, että ketjun jäsenet saisivat kellon kahta synkronointipolkua pitkin, jotka kulkevat eri reittejä. Varareitin tulee kytkeytyä käyttöön, jos pääasiallinen reitti katkeaa ja reitiksi tulisi valita korkein saatavilla oleva hierarkiataso. Näin pyritään välttämään verkkoelementin kellon päätyminen ylläpito tai vapaasti juoksevaan tilaan ilman ulkoista referenssilähdettä. Eri tiloista kerrotaan lisää seuraavassa luvussa. [12]

4.4 Vaihelukittu silmukka

Verkkolaitteissa synkronoinnin toteuttaa elektroniikkatasolla komponentti nimeltä vaihelukittu silmukka (Phase Locked Loop, PLL). Se on säätöjärjestelmä, joka tuottaa ulostulostaan signaalin, jolla on kiinteä suhde sisään tulevan referenssisignaalin vaiheeseen. PLL reagoi vaihevertailijan avulla referenssisignaalin taajuuden, sekä vaiheen muutoksiin ja säätää niiden mukaan sisältämänsä oskillaattorin taajuutta käyttäen negatiivista takaisinkytkentää. Referenssisignaali tyypillisesti alipäästösuodatetaan ennen oskillaattorille vientiä. Yksinkertaisen vaihelukitun silmukan lohkokaavio on esitetty kuvassa 13. [5]



Kuva 13 Vaihelukitun silmukan lohkokaavio [5]

Tavoitteena on pitää oskillaattori samassa vaiheessa ja samalla taajuudella kuin primäärikellosta johdettu referenssisignaali. PLL-piirin sanotaan olevan lukittuna kun lähtösignaalin taajuus seuraa tulosignaalin taajuutta. Vakaan tilan vaihe-ero kuvaa keskimääräistä eroa referenssisignaalin ja takaisinkytketyn signaalin vaiheiden välillä. Sen tulisi olla mahdollisimman pieni.

Vaihe askelia tavataan yleensä verkon minimiviiveen vaihtuessa. Taajuuseroa tavataan järjestelmän käynnistysvaiheessa kun referenssikello ja paikallinen kello käyvät nimellisillä taajuuksillaan, jotka poikkeavat toisistaan. Taajuushypyt ovat harvinaisempia kuin vaiheen hypyt. Esimerkiksi lämpötilan muutos saa aikaan taajuuden muutoksen. [22]

Stabilointijaksoksi kutsutaan aikajaksoa, joka alkaa PLL:n sisältävän laitteen valittua ajastuslähteen ja päättyy kun vaihelukitun silmukan ulostulon kellosignaali täyttää jitter ja wander vaatimukset. Suositus G.8261 antaa ohjeelliseksi stabilointijakson pituudeksi adaptiivisia kellonpalautusmenetelmiä käytettäessä vähintään 15 minuuttia [23].

Vaihelukittu silmukka voi olla kolmessa toimintatilassa, joita ovat referenssiin lukittu, ylläpito sekä vapaasti juokseva tila. Referenssiin lukittu tila jakautuu vielä kolmeen osaan joita ovat normaalitila, vaiheen seuranta sekä taajuuden seuranta. Normaalitilassa sekä taajuus, että vaihe ovat lukittuja ja silmukka on hyvin vakaassa tilassa ulostulon taajuuden keskiarvon ollessa pitkällä aikavälillä sama kuin sisääntulon taajuuden. Vaiheenseurantatilassa taajuus on edelleen lukittu, mutta vaihelukitus on pettänyt ja se pyritään palauttamaan. Taajuudenseurannassa molemmat edellä mainitut ovat pettäneet ja pyritään pääsemään ensin takaisin taajuuslukittuun tilaan.

Mikäli taajuuden seuranta jatkuu tietyn aikaa tuloksetta, siirtyy PLL automaattisesti ylläpitotilaan, jossa käytetään muistissa olevaa tietoa keskimääräisestä taajuudesta ja vaiheesta normaalitilasta. Ylläpitotila päättyy, mikäli kello palaa lukittuun tilaan. Pitkällisen referenssittömän jakson jälkeen saatetaan siirtyä vapaasti juoksevaan tilaan, jolloin laite käyttää ainoastaan omaa sisäistä kelloaan ilman tietoa ympäröivien laitteiden kellosta. Tässä tilassa ollaan myös ennen kuin kello on koskaan ollut lukittuna ulkoiseen referenssiin. Seurauksena on tyypillisesti luiskahduksia ja bittivirheitä. [13]

4.5 Kellojen ominaisuudet

Ylläpitotilan stabiilisuus kuvaa kellon kykyä ylläpitää tarkkaa aikaa tilanteessa, jossa yhteys referenssilähteeseen on katkennut. Tyypillisesti aika-jaksona määrittelyssä käytetään yhtä vuotta. Suurin sallittu wander kuvaa kellon pitkän aikavälin sallittua taajuusvaihtelua. Luiskahdustiheys kertoo, kuinka usein kellolle saa enintään tapahtua luiskahduksia.

Pitoalue (hold-in range) kuvaa suurinta eroa referenssisignaalin taajuuden ja PLL paikallisoskillaattorin taajuuden välillä, jolla kello vielä pysyy lukittuna referenssiin. Lukkiutumisalue (pull-in range) kertoo, millä taajuuserolla oskillaattori pystyy lukittumaan referenssisignaaliin. Pitoalue on lukkiutumisaluetta suurempi. Vastaavasti irrotusalue (pull-out range) kuvaa taajuuseroa, jonka ylittänyttä signaalia ei tule hyväksyä referenssiksi ja lukitus tulee irrottaa. Laitteen tulisi aktivoida tällöin hälytys. Nämä arvot on asetettu suosituksissa G.812 ja G.813 samoiksi, mikä on kyseenalaista, sillä oskillaattorin tarkkuuden tulisi riittää erottamaan nämä toisistaan. Lukkiutumisalue on näistä kolmesta arvosta tärkein. Eri kellotyyppien vaaditut ominaisuudet on esitetty liitteen 1 taulukossa. [13]

5 Pseudojohtoemulaatiotekniikat

Verkkojen yhdentymiskehityksen johdosta on syntynyt tarve varmistaa piirikytkentäisten verkkojen erityisominaisuuksien kuten synkronoinnin, signaloinnin, äänen laadun ja hälytysten toiminnan jatkuminen pakettiverkoissa [24]. Pseudojohtoemulaatiotekniikat ovat siirtymäajan ratkaisuja tähän ongelmaan. Pseudojohtoemulaatiolla tarkoitetaan tunnelointiratkaisuja, joilla voidaan siirtää piirikytkentäiset yhteydet pakettipohjaisten verkkojen yli. Pseudojohto on virtuaalinen piiri, joka yhdistää kaksi verkon reunalaitetta läpinäkyvästi toisiinsa. TDM-yhteyden toteuttavasta palvelusta käytetään yleisesti nimitystä piiriemulointipalvelu (Circuit Emulation Service, CES).

Emulaatioissa on pohjimmiltaan kyse datan pilkkomisesta pienempiin osiin ja kehystämisestä sopivan kokoisiin paketteihin, joita siirretään pakettiverkkoalustalla vastaanottajalle. RFC 3985 määrittelee rakenteen ja arkkitehtuurin Frame Relay, ATM (Asynchronous Transfer Mode), Ethernet ja TDM-verkkojen emuloimiseksi pakettiverkon yli IP- tai MPLS-alustalla [25]. Tässä työssä käsitellään vain sarjaliitännäisen ja TDM-pohjaisen liikenteen emulaatiota MPLS-verkkoalustalla. Käsittely hoidetaan pääosin kansainvälisiin standardeihin pohjautuen tilanteissa, joissa Pohjois-Amerikassa käytetään eri määrittelyjä kuten SDH/SONET ja E1/T1.

Israelilainen RAD julkaisi ensimmäisen TDM over IP -ratkaisunsa jo vuonna 1999. IETF aloitti pseudojohtoemulaatiotekniikoiden standardoinnin vuonna 2001 Pseudo Wire Emulation Edge to Edge (PWE3) nimisessä työryhmässä, jonka tehtävänä on kehittää standardeja useille palveluille, joita emuloidaan tunneloimalla pakettiverkon yli. Aihealueen uranuurtajia ovat olleet Alexander "Sasha" Vahnestein Axerra Networksista ja Yakoov Stein RAD Data Communicationsilta, joiden julkaisemiin luonnoksiin nykyiset kolme pääasiallista standardia perustuvat. Käytännössä standardikehitys on ollut näiden kahden leirin välinen kilpailu 2000-luvun alkuvuosina, jonka lopputuloksena ei koskaan syntynyt yhtä yhteistä standardia. Markkinoilla olevissa tuotteissa RAD:n teknologiaa näyttäivät käyttävän vain he itse.

5.1 Standardointiorganisaatiot

Tässä luvussa esitellään kolme tärkeintä standardointiorganisaatiota, joilla on merkitystä data- ja televerkkojen yhdentymiskehityksessä ja pseudojohto-emulaatiotekniikoissa. Järjestöjen tavoitteet, toimintatavat ja julkaistavat dokumenttityypit käydään läpi lyhyesti, jotta voidaan paremmin ymmärtää niiden roolit kehitystyössä ja voidaan paremmin vertailla niiden tuottamia hyvinkin samansisältöisiä dokumentteja tästä aihepiiristä.

Kansainvälinen televiestintäliitto (ITU) vastaa maailmanlaajuisesti perinteisten televerkkojen määrittelyistä ja yhteensopivuuden takaamisesta erityyppisten verkkojen kesken. Internet Engineering Task Force (IETF) pääasiallinen rooli on määrittää Internetissä käytettäviä protokollia, kuten myöhemmin tässä luvussa esiteltävät pseudojohtoemulaatiotekniikat. Metro Ethernet Forum (MEF) ajaa Ethernet-teknologian käytön laajentamista koko verkon laajuiseksi alan teollisuuden tukemana Seuraavat aliluvut esittelevät järjestöt tarkemmin.

5.1.1 Kansainvälisen televiestintäliitto (ITU)

Kansainvälisen televiestintäliiton telekommunikaation standardointiosasto (ITU-T) koordinoi telealan standardeja. Viestintävirasto edustaa järjestössä Suomea. ITU on luonteeltaan hallitustenvälinen julkisen ja yksityisen sektorin organisaatio, jonka jäsenenä on yli 190 valtiota ja useita satoja yrityksiä. Sillä on asema YK:ssa televiestintäasioita hoitavana erityisjärjestönä. ITU-T:n edeltäjä oli nimeltään kansainvälinen lennätin ja puhelin konsultaatiokomitea (CCITT), johon vielä monet vanhemmat dokumentit viittaavat. [26]

ITU-T:n julkaisut kulkevat nimellä "Recommendation". Käytännössä niillä on kuitenkin maailmanlaajuisen standardin asema. Ne on nimetty muodossa "X.123" jossa alussa on kirjain, joka kertoo mihin sarjaan standardi kuuluu. Jokaiselle englannin kielen aakkoselle löytyy oma sarjansa ja sama dokumentti voi kuulua useampaan sarjaan. Tämän työn kannalta oleellisimpia ovat siirtojärjestelmiä käsittelevä G-sarja ja seuraavan sukupolven verkkoja käsittelevä Y-sarja. Standardit ovat saatavilla ilmaiseksi Internetistä.

ITU on standardoinut kaikki piirikytkentäisiin verkkoihin liittyvät asiat ja heidän dokumenttinsa asettavat raja-arvot, joita laitteiden tulee pystyä noudattamaan. Pakettiverkkojen yhteydessä rooli on yleensä vahvistaa IETF:lta tulevia määrittelyjä. Siten esimerkiksi pseudojohdoille löytyy sisällöltään lähes vastaavat standardit molemmilta järjestöiltä. Kaksi tärkeintä aihealuetta standardia ovat TDM-liikennettä MPLS-verkoissa käsittelevä Y.1413, sekä IP-verkoissa vastaavasti Y.1453.

5.1.2 Internet Engineering Task Force (IETF)

IETF määrittelee itsensä seuraavasti: Se on avoin globaali ryhmittymä verkon suunnittelijoita, operoijia, laitetoimittajia ja tutkijoita, jotka tuottavat teknisiä määrityksiä Internet-arkkitehtuurin kehittämiseksi ja sulavan toiminnan varmistamiseksi. Se on yritysriippumaton ja osittain Internet Societyn (ISOC) tukema, joka varsinaisesti koordinoi Internetin standardointia. [27]

IETF määrittelee tavoitteekseen tuottaa korkealaatuisia teknisiä dokumentteja, jotka vaikuttavat ihmisten tapaan suunnitella, käyttää ja hallita Internetiä siten, että se saadaan toimimaan paremmin. Tällaisiksi dokumenteiksi luetaan protokolla standardit, hyväksi havaitut käytännöt, sekä erinäiset informatiiviset dokumentit. [28]

IETF on organisoitunut kymmeniin työryhmiin, jotka toimivat kahdeksan aihealueen alaisuudessa. Työryhmät koostuvat vapaaehtoisista, jotka toimivat niissä yksityishenkilöinä ja niihin voi liittyä kuka tahansa. Kokoontumisia järjestetään kolme kertaa vuodessa, mutta pääosa työstä tapahtuu postituslistojen välityksellä. [29]

IETF on määritellyt useimmat Internetissä käytetyt protokollat. Standardointityö on moniportainen prosessi. IETF tuottaa pääasiassa kahdenlaisia teknisiä dokumentteja; Internet-Draft ja Request for Comments (RFC). Määritelmän kehitysvaiheessa siitä julkaistaan vedosversioita, jotka ovat kaikkien saatavilla Internetissä. Mikä vedos ei päivitty puoleen vuoteen, tai sitä ei julkaista RFC:na, se yksinkertaisesti poistuu ja sen elinkaari päättyy. Vedoksilla ei ole formaalia asemaa ja ne voivat muuttua tai poistua koska vain. Siksi niihin ei koskaan tulisi viitata missään virallisissa yhteyksissä. Totuus kuitenkin oli, että monen laitevalmistajan esitteet viittaavat draft-versioihin standardeista. [30]

Merkittäviksi koetut RFC:t voivat saavuttaa Internet Standard-statuksen, jolloin ne saavat lisätunnisteen "STDxxx". Hyviä työskentelytapoja dokumentoivat RFC:t, voivat saada "Best Current Practice"-statuksen ja "BCPxxx" lisätunnisteen. RFC ei koskaan

päivity julkaisunsa jälkeen, mutta se voidaan korvata toisella erinumeroisella dokumentilla. [30]

5.1.3 Metro Ethernet Forum (MEF)

Metro Ethernet Forum (MEF) on maailmanlaajuinen telealan yritysten yhteenliittymä, jonka tehtävä on kehittää teknisiä määräytyksiä ja toteutussopimuksia Carrier Ethernet-verkkojen ja palveluiden käyttöönoton edistämiseksi. Sen päämääriä ovat yhteisymmärryksen löytäminen palveluntarjoajien, laitevalmistajien ja kuluttajien välille Ethernetin kehityssuunnista, helpottaa nykyisten ja uusien standardien käyttöönottoa ja lisätä maailmanlaajuisia tietoisuutta Ethernet-palveluiden ja -verkkojen hyödyistä. Organisaatio määrittelee metropolialueen Ethernet-siirtoverkkoihin liittyvää arkkitehtuuria, protokollia ja verkonhallintaa, sekä tukee näihin verkkoihin tarkoitettuja palveluita. Julkaisu on nimetty mallilla "MEF x", jossa x:n korvaa juokseva numerointi. [31]

MEF tarjoaa standardimäärittelyjen lisäksi yhteensopivuuden varmentavan sertifikaattiohjelman, testausjärjestelmiä edellisen toteamiseen, koulutusohjelmia, markkinointimateriaalia ja esimerkkejä Carrier Ethernet-verkkojen toteutuksesta. Pseudojohtojen käsitteleviä määräytyksiä ovat määritelmät, vaatimukset ja viitekehyksen määrittelevä MEF 3 [32], PDH-piirien toteutusta Metro Ethernetissä käsittelevä MEF 8 [33], sekä piiriemuloinnin testausjärjestelmiä määrittelevä MEF 18 [34].

5.2 Pseudojohtoemuloidun palvelun referenssiarkkitehtuuri

Kuvassa 14 esitellään verkkoarkkitehtuuri, jossa pakettiverkko yhdistää kaksi toisistaan erillään olevaa TDM-verkkoa. Piiri- ja pakettikytkentäisten verkkojen rajapinnassa sijaitsee yhteensovitusfunktio IWF (Interworking Function). Pseudojohto yhdistää kaksi liitäntää virtuaalipiiriin avulla toisiinsa. Sisääntulo sitoo TDM-piiriin pakettiverkkoon ja ulostulo vastaavasti pakettiverkon TDM-piiriin. IWF on toiminnallinen lohko, joka segmentoi ja kapseloi TDM liikenteen kulloiseenkin emulaatiotyyppiin sopivaan muotoon pseudojohdon sisääntulossa ja vastaavasti purkaa kapseloinnin ulostulossa ja kokoaa segmenteistä alkuperäisen TDM-liikenteen. IWF:ssa sijaitsee usein hallinnollinen raja operaattorin ja asiakkaan välillä, siten että IWF:n sanotaan olevan operaattorin verkon reunalaitte (Provider Edge, PE). Tunnelointitekniikka helpottaa piiriemulointipalvelun tuottamista runkoverkon näkökulmasta, sillä palvelun luomiseksi tarvitsee säätää vain reunalaitteita. [24]



Kuva 14 Pseudojohtoemuloidun palvelun referenssiarkkitehtuuri [25]

TDM-palvelut verkon molemmissa päissä olevissa järjestelmissä vaativat toimiakseen keskenään samassa tahdissa olevia kelloja. IWF hoitaa kellojen synkronoinnin myöhemmin luvussa 6 kerrottavalla tavalla.

Pseudojohtoemulaatio tapahtuu protokollapinossa kolmella toiminnallisella tasolla, joita ovat verkkokerros, sovituserkos ja sovelluserkos. Verkkokerros määrittää käytettävän osoitteistuksen ja pseudojohtopakettien kulkeman polun verkossa. Sovituserkos koostuu kanavoinnin ja kapseloinnin hoitavista alikerroksista. Kanavointikerros mahdollistaa useamman piiriemulointipalvelun kuljettamisen yhdessä tunnelissa erottelemalla eri pseudojohdot toisistaan yksilöivällä tunnisteella. Kanavointikerroksen tekniikka riippuu usein käytettävästä verkkokerroksen tekniikasta. Kapselointikerros sisältää tiedot, joiden perusteella emuloitu palvelu saadaan palautettua alkuperäiseen muotoon. Sovelluserkos sisältää TDM-yhteyden hyötykuorman, joka voi olla raakadataa tai pakattuna johonkin kehykseen. Kerroksia havainnollistava kuva löytyy myöhemmin aliluvusta 5.6.

5.3 Emulointipalvelun luonti MPLS-verkossa

Pseudojohdot hyödyntävät MPLS (Multiprotocol Label Switching) -teknologiassa käytettyjä leimoja sarjaliikenteen siirtämiseen MPLS-tyyppisen pakettiverkon yli. Vastakkaisilla siirtosuunnilla ei välttämättä tarvitse olla käytössä sama leima. Hyötykuorman ja kontrollisanan kapselointi tunnelia varten tapahtuu lisäämällä pakettiin uusi MPLS-leima. [35]

Yhtä tunnelia pitkin voidaan kuljettaa useita pseudojohtoja, joten käytännössä paketeilla on kaksi peräkkäistä leimaa. Sisempi pseudojohtoleima kertoo, mihin pseudojohtoon kyseinen paketti kuuluu vastaten perinteisten verkkojen kanavointia. Päällimmäinen tunnelileima kertoo, mitä polkua tunneli parhaillaan käyttää. Pseudojohto siirtää kehyksiä MPLS-tunnelien yli, joita kuvaavat leimapolut (Label Switched Path). Muutkin tunnelointimenetelmät käyvät, kunhan ne pystyvät käsittelemään MPLS-paketteja. [35]

MPLS-verkon leimoja vaihtava reititin (Label Switching Router) saattaa joutua vaihtamaan päällimmäistä leimaa siirryttäessä tunnelista toiseen keskellä verkkoa. Pseudojohtostandardit eivät ota kantaa tunnelileiman välittämisen menetelmiin. Vastapään viimeisen reitittimen täytyy pystyä päättämään pseudojohtoleimasta, mille liitännälle paketin sisältö tulee ohjata. [35]

Pseudojohtoleiman välittämiseen voidaan käyttää laajennettua LDP:aa (Label Distribution Protocol) [35], tai leima voidaan asettaa staattisesti. Operaattorin reunareitittimet luovat välillensä LDP-istunnon. Jotta tämä olisi mahdollista, täytyy tunnelin päätepisteen reitittimen tuntea alkupisteen reitittimen osoite.

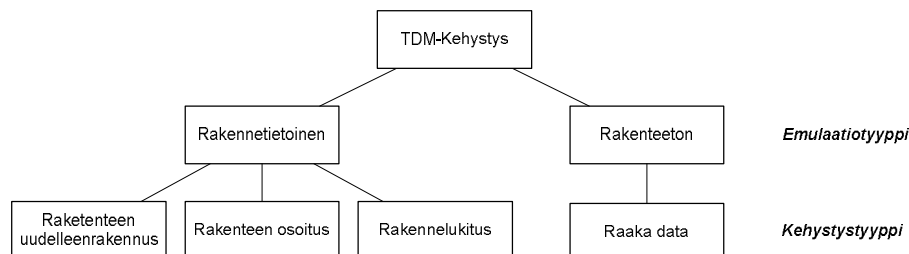
Päätepisteen reititin käynnistää yhteydenmuodostuksen lähettämällä alkupisteen reitittimelle LDP-leiman kohdennusviestin, jolla tietty pseudojohto sidotaan tiettyyn liitântään. Reunareitittimen tulee lähettää leiman kohdennusviestejä heti, kun pseudojohdon asetukset on määritelty ja se on ylläpidollisesti käyttöön otetussa tilassa. Fyysisesti TDM-piiri voi olla silti kytkemättä. [35]

Saadessa vastausviestin, päätepieste luo pseudojohdon omalta osaltaan. Mikäli kohdennus ei onnistu annetuilla tiedoilla, lähettää päätepieste reititin alkupäähän leiman vapautusviestin, jolla prosessi purkautuu. Yksi pseudojohto koostuu aina kahdesta yksisuuntaisesta leimapolusta, joiden päätepiesteet ovat käänteiset. [35]

Pseudojohtoleimojen tulee olla olemassa, ellei kyseistä tunnelia tai piiriemulaatiopalvelua erityisesti kytketä pois käytöstä. Mikäli kytköstä leiman ja pseudojohdon välillä ei löydy, tulee olettaa palvelun olevan poissa käytöstä. [35]

5.4 TDM-tyypit ja siirtotekniikat

TDM-pseudojohdot voidaan jakaa karkeasti rakenteetonta ja rakennetietoista siirtoa tukeviin luokkiin, jotka sisältävät edelleen erilaisia kehystystyyppejä. Ne esitellään seuraavissa alaluvuissa. Luokittelu on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15 TDM-siirtotekniikoiden luokittelu

Rakenteeton TDM voi siirtää kaikki bitit hyötykuormana ja se noudattaa ITU-T:n suosituksessa G.702 määriteltyä digitaalisen hierarkian bittinopeuksia. E1 nopeuden rakenteeton yhteys määritellään suosituksessa G.703. Siitä käytetään yleisesti myös nimitystä kehuksetön E1. Se on paljon käytetty muoto pelkkää dataa sisältävissä sovelluksissa. [36]

Rakenteellisissa TDM:ssä käytetään rakenteita, kuten kehyksiä, ylikehyksiä ja kanavointia. Kehyksiä käytetään usein kanavoimaan useita kanavia yhdelle yhteydelle, jolloin voidaan käyttää myös termiä kanavoitu TDM. Tyypillisin kehystetty rakenne on 32-kanavainen E1-kehys, joka on määritelty suosituksessa G.704. Kanavoitu TDM on paljon käytetty muoto puhe-sovelluksissa. [36]

Siirtotekniikat on määritelty eri standardidokumenteissa, riippuen siitä mikä on käytettävän pakettiverkon tyyppi. MPLS-verkoille määritykset löytyvät ITU:n suosituksesta Y.1413. Vastaavat määritykset IP-verkoille löytyvät puolestaan suosituksesta Y.1453. Ethernet-verkossa tapahtuva siirto kuvataan Metro Ethernet Forumin dokumentissa MEF 8.

5.4.1 Rakenteeton siirto

Rakenteettomassa siirrossa TDM dataa käsitellään kuin bittivirtaa ilman tietoa sisäisistä rakenteista. Sitä käytetään aina rakenteettoman TDM:n siirtoon tai rakenteellisen TDM:n siirtoon tilanteissa, joissa rakenteella ei koeta olevan merkitystä siirtoverkon kannalta. Rakennebitit, kuten TDM-signaalointi ja kehystys kulkevat hyötykuorman seassa, eikä niitä ole mahdollista käsitellä siirron yhteydessä. Siten rakenteen eheyttä ei kyetä varmistamaan mitenkään vastaanottopäässä.

Paketin koko voi olla mielivaltaisen, eikä sen tarvitse rajautua tavu- tai kehysrajan mukaan. Koosta täytyy sopia siirron käynnistämisen yhteydessä. Rakenteettoman siirron toteutukseen on määritelty protokolla Structure-Agnostic Transport over Packet (SAToP) [37]. Tekniikka esitellään tarkemmin luvussa 5.6.1. [36]

5.4.2 Rakennetietoinen siirto

Rakennetietoinen siirto osaa huomioida ainakin jollain tasolla TDM-rakenteen tutkimalla sitä pseudojohdon reunalaitteessa. Ei ole kuitenkaan takeita, että bittivirta siirrettäisiin sellaisenaan, vaan osa biteistä voidaan jättää pois ja tuottaa uudelleen vastaanottopäässä. Näin tapahtuu esimerkiksi kehyslukitussignaalin tapauksessa. Kyky

erottaa yksittäiset kanavat toisistaan mahdollistaa pakettihukkaan reagoimisen ja kaistan säästön, kun kaikki aikavälit eivät ole käytössä. Mikäli paketteja katoaa tai saapuu liian myöhään, tyhjä tila täytetään täytebiteillä ajastuksen säilyttämiseksi. TDM-signaali saadaan myös näkyviin, mikä mahdollistaa tiedon hyödyntämisen ja muokkaamisen. Se ei ole mahdollista rakenteettomassa siirrossa. Rakenteen siirtoon on varattu 8 bittiä joka E1-kehuksesta.

Rakennetietoisien siirron toteuttamiseen on määritelty protokollat Structure-Aware Time Division Multiplexed Circuit Emulation Service over Packet Switched Network (CESoPSN) ja Time Division Multiplexing over IP (TDMoIP). Tekniikat esitellään tarkemmin luvuissa 5.6.2 ja 5.6.3. Rakennetietoinen siirto voi varmistaa tiedon eheyden kolmella erityisellä kehystystavalla, jotka esitellään seuraavissa luvuissa. [36]

5.4.2.1 Rakennelukittu kehystys

Kehyksen rakennelukitus varmistaa, että jokaisessa paketissa kulkee yksi tai useampi kokonainen TDM-kehys. Ylikehyksen täytyy sopia yhteen pakettiin, tai on otettava käyttöön erityisiä pilkkomismenetelmiä. Paketin pitää alkaa aina kehyksen alusta. Kehysten lukumäärä on lukittu pseudojohdon luonnin yhteydessä ja se on sama molempiin suuntiin. Siten paketin täyttöön kuluva aika on vakio, kehysten lukumäärä M kertaa 125 mikrosekuntia. Kehysten järjestys on paketissa sama kuin E1-kehyksessä. CESoPSN käyttää rakennelukitusta [38]. Muoto on esitetty kuvassa 16. Paketin lopussa sijaitseva signaalintialirakenne on käytössä, mikäli TDM-yhteys käyttää kanavakohtaista merkinantoa. Tällöin aikavälejä on tyypillisesti käytössä 30 ja kehyksiä per paketti on 16. [39]

Kehysnumero	Bitit							
	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Aikaväli 1							
	Aikaväli 2							
	...							
	Aikaväli N							
2	Aikaväli 1							
	Aikaväli 2							
	...							
	Aikaväli N							
...	...							
M	Aikaväli 1							
	Aikaväli 2							
	...							
	Aikaväli N							
Signalointi alirakenne lopussa	Signalointibitit aikavälille 1			Signalointibitit aikavälille 2				
	Signalointibitit aikavälille 3			Signalointibitit aikavälille 4				
				
	Signalointibitit aikavälille N			Täytebitit, jos N pariton				

Kuva 16 Rakennelukitun kehyksen tietomuoto [39]

Liitteessä 2 on tavutason esitys vastaavasta rakenteesta, johon on merkattu huomioväreillä paketista löytyvät otsakkeet. Kontrollisanan ja signaalintirakenteen välinen alue on hyötykuormaa. Paketin lopussa on yhteensä 15 tavua arvolla ff kuljettamassa 30:n aikavälin signaalintibitit.

5.4.2.2 Rakenteen osoittava kehystys

Rakenteen osoitus on johdettu ATM-teknologian AAL1-sovituksesta. Tämän kehystyksen käyttö helpottaa siten yhteensovittamista ATM-tekniikan kanssa. Yksi paketti sisältää hyötykuormassa yhden tai useamman siirtoyksikön (Protocol Data Unit, PDU). Niiden lukumäärän täytyy olla ennalta säädetty ja sama molempiin suuntiin. Suositeltu PDU:n määrä on yhdestä kahdeksaan sovitettaessa E1-yhteyksiä. Suurin Ethernetin pakettikoon sallima määrä on 30. Paras hyötysuhde saavutetaan laittamalla useita yksikköjä yhteen pakettiin, mutta samalla latenssi kasvaa. E1-kehysten ollessa kooltaan 32 tavua, hukkatila on melkoinen yhden PDU:n tapauksessa. [40]

Toisin kuin rakennelukitus, rakenteen osoitus mahdollistaa mielivaltaisen mittaisten TDM-kehysten palasien kuljettamisen pseudojohdolla. PDU:n sisällä varsinaista hyötykuormaa varten on käytössä 47 tavua yhden tavun ollessa otsakekäytössä. Otsake sisältää osoittimen, joka kertoo kehysten välisen rajan sijainnin hyötykuormassa. Täten kehys voi jakautua keskeltä useampaan siirtoyksikköön. Mikäli kuljetetaan vain osa aikaväleistä, muodostavat ne kehukseen verrannollisen rakenteen. [39]

PDU:n sisällä voidaan siirtää rakenteellista tai rakenteetonta tietoa. Rakenteellisen tiedon yhteydessä voidaan lähettää CAS-bitit samalla tavoin kuin rakennelukituskehystyksessä. Tästä rakenteesta käytetään nimitystä piiriemulaatio ja se on käytössä TDMoIP:ssä vakionopeuksiselle liikenteelle [40]. Muoto on esitetty kuvassa 17. [39]

Kontrolli- sana	Pseudojohtopaketin hyötykuorma						
	AAL1 PDU 1		AAL1 PDU 2		...	AAL1 PDU N	
	Kanavan otsake (1 B)	Hyötykuorma (47 B)	Kanavan otsake (1 B)	Hyötykuorma (47 B)	...	Kanavan otsake (1 B)	Hyötykuorma (47 B)

Kuva 17 Rakenteen osoittavan kehystyksen tietomuoto [39]

5.4.2.3 Rakenteen uudelleenrakentava kehystys

Rakenteen uudelleenrakentava kehystys mahdollistaa TDM-rakenteen pilkkomisen siten, että verkkorajapinnan yhteensovitusfunktio erottelee aktiiviset aikavälit ja lähettää vain ne pakettiverkkoon. Menetelmää käytetään vain kanavoidun TDM:n tapauksessa. Algoritmi osaa reagoida aktiivisten kanavien määrän muutoksiin pseudojohtopalvelun elinaikana, toisin kuin aiemmat tekniikat ja näin se voi säästää kaistaa. Tyypillisin käyttötarkoitus on puhelin- tai faksiyhteyksien siirto. [41]

Menetelmä on johdettu ATM-teknologian AAL2-sovituksesta. AAL2 PDU sisältää 3 tavua otsaketietoja ja 1–64 tavua hyötykuormaa. Haluttaessa yhteensopivuutta ATM:n kanssa, täytyy hyötykuorman koko rajata 45 tavuun. Hyötykuorma koostuu alikehyksistä, jotka voivat olla tyypiltään kontrolli- tai primäärikehysiksi. Kontrollikehykset esiintyvät aina yksinään, mutta primäärikehysiksi voi olla vaihteleva määrä per paketti ja niiden keskinäinen koko voi vaihdella. Mukana kulkee riittävästi tietoa koko rakenteesta, jotta pseudojohdon purkava IWF osaa kasata rakenteen alkuperäistä vastaavaksi. [42]

AAL2 on määritelty kokonaisuudessaan ITU:n suosituksessa I.366.2 [42]. Pseudojohtojen kanssa käytettävä kehystys on määritelty MPLS-verkoille suosituksessa Y.1414 [41]. Tästä rakenteesta käytetään nimitystä silmukkaemulaatio ja se on käytössä TDMoIP:ssä vaihtelevanopeuksiselle liikenteelle [40]. Yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 18.

Kontrolli- sana	Pseudojohtopaketin hyötykuorma						
	AAL2 PDU 1		AAL2 PDU 2		...	AAL2 PDU N	
	Kanavan otsake (3 B)	Hyötykuorma (1-45/64 B)	Kanavan otsake (3 B)	Hyötykuorma (1-45/64 B)	...	Kanavan otsake (3 B)	Hyötykuorma (1-45/64 B)

Kuva 18 Rakenteen uudelleenrakentavan kehystyksen tietomuoto [41]

5.5 Pseudojohto-otsaketyyppi

Pseudojohtopalvelujen referenssiarkkitehtuuriin kuuluu 4-tavuinen otsake, josta käytetään yleisesti nimitystä kontrollisana. Otsake tarjoaa pakettien järjestysnumeroinnin ja virheiden ilmaisumenetelmän sekä se sitoo hyötykuorman verkkokerroksen protokoliin. Kontrollisanan käytöstä on sovittava yhteyden muodostuksen yhteydessä. Kentät on suunniteltu niin, ettei MPLS-verkon leimoja vaihtava reititin (Label Switching Router, LSR) sekoita pseudowire liikennettä tavalliseen IP-liikenteeseen. Tällä tavoin voidaan välttää liikenteen jako usealle samanarvoiselle reitille ja siten varmistaa pakettien oikea saapumisjärjestys. [43]

Paketin ensimmäiset 4 bittiä vastaavat IP-paketin versionumeroa (0004 tai 0006), minkä johdosta on tärkeää asettaa sille muu arvo. Pseudowire otsakkeita on kahta tyyppiä, joista ensimmäistä käytetään datan siirtoon (bittien arvona 0000) ja jälkimmäistä hallintatoimintoihin (arvona 0001). Otsakkeen tulee seurata välittömästi MPLS-leimapinon "pohjan" jälkeen. Kaikki emulaatiostandardit käyttävät samaa perusmuotoa, joka on määritelty standardeissa RFC 4385 ja Y.1413. Kontrollisanan rakenne bittitasolla on esitetty kuvassa 19. [43]

Bitit											
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Varattu (0000)				L	R	M (2 b)		FRG (2 b)		LEN (pituus) (6 b)	
										SN (järj.numero) (16 b)	

Kuva 19 Suositeltu kontrollisanan rakenne [24]

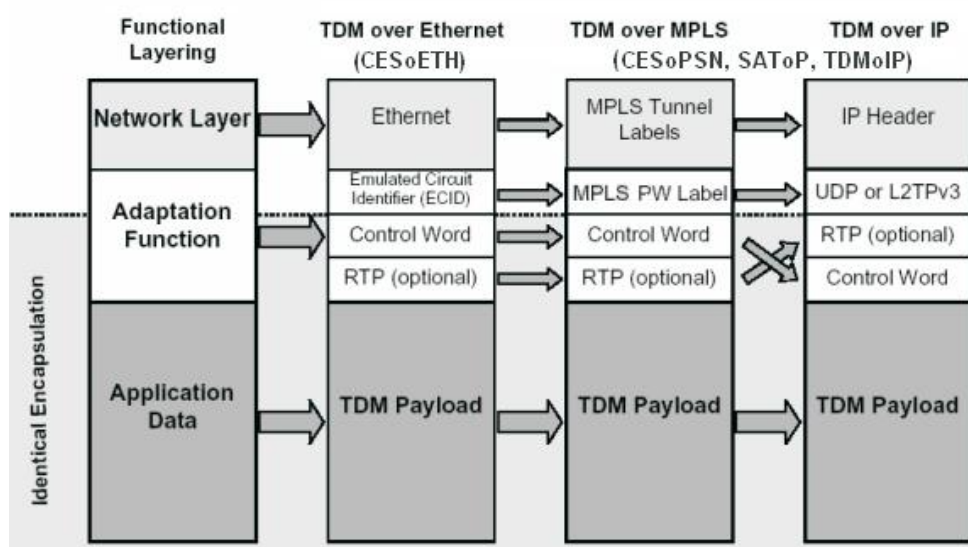
Kenttien käyttötarkoitukset:

- **Varattu** = 0000, pakettia käytetään tiedonsiirtoon
= 0001, pakettia käytetään palvelunhallintaan
- **L** = 1, virhe paikallisella IWF:lla (virheellistä TDM dataa sisääntulossa)
- **R** = 1, virhe vastapään vastaanottavalla IWF:lla (paketteja on hukkunut matkalla)
- **M**: Täydentää L-bittiä tarjoten erilaisia virhekuvauksia (RDI, AIS)
- **FRG**: Käytetään monikehysrakenteiden pilkkomiseen useisiin paketteihin
- **LEN**: Pakettikoko (hyötykuorma + kontrollisana) jos se on alle 64 tavua, muuten aina 000000
- **SN**: 16-bittinen järjestysnumero, jonka luontitapa vaihtelee riippuen kehystystekniikasta. CESoPSN käyttää RTP:n luontimekanismia.
- Jos pakettia käytetään palvelunhallintaan, bitit 4-15 ovat arvoltaan 0. Tällöin viimeiset kaksi tavua määrittelevät kanavan tyyppin RFC 4446 mukaisesti [44].

5.6 Emulaatiostandardit

Tässä luvussa esitellään kolme IETF:n määrittelemää standardia TDM-piiriemulaatioon, nimiltään Structure-Agnostic Transport over Packet (SAToP), Structure-Aware Time Division Multiplexed Circuit Emulation Service over Packet Switched Network (CESoPSN), sekä Time Division Multiplexing over IP (TDMoIP). Metro Ethernet Forumin määrittämä Circuit Emulation Services over Ethernet (CESoETH) on ominaisuuksiltaan yhdistelmä kaikista edellä mainituista, joten sitä ei käsitellä erikseen. Suurimmat erot ovat kehysten rakenteessa, jotka ovat täysin Ethernet-pohjaisia. Kaikki standardit seuraavat PWE3-arkkitehtuuria [25] ja ne täyttävät IETF:n määrittelemät yleiset pseudojohtoemulaation vaatimukset [45]. Pakettiverkko, jonka päällä emulaatiota käytetään, voi olla tyypiltään IP, MPLS tai Ethernet.

Kuva 20 havainnollistaa toiminnallisten kerrosten kehysrakenteiden samankaltaisuuden eri standardien välillä. Erot tulevat hyötykuorman pakkaustavasta, sovituserroksen kanavoinnin hoitavassa otsakkeesta ja verkkokerroksen tekniikasta. IP:tä käytettäessä kontrollisana ja valinnainen RTP-otsake vaihtavat paikkaa. MPLS-pohjaisen testiverkon kehysrakenteet sellaisena kuin ne verkossa esiintyvät SAToP- ja CESoPSN-kehystyksiä käytettäessä löytyvät myöhemmin tulosluvusta 9.4.



Kuva 20 Yhteenveto pseudojohtostandardien kehysrakenteiden eroista [46]

5.6.1 Rakenteeton siirto pakettiverkossa (SAToP)¹

Kolmesta emulaatiostandardista SAToP on yksinkertaisin. Määritelmä toteuttaa rakenteettomien TDM-piirien emulaatiota. Se ei ymmärrä TDM-rakenteita, kuten kehystystä, vaan siirtää kaiken saavansa tiedon pelkkänä bittivirtana. Siten sen hyötysuhde on tekniikoista paras. Rakenteeton siirto esiteltiin aiemmin luvussa 5.4.1. Tuettuja TDM-palvelutyypppejä ovat E1, E3, T1 ja T3. Rakenteellista tietoa voidaan siirtää tällä tekniikalla, mutta virheenkorjausta ei ole, eikä kehystyksen tietoja päästä käsittelemään. Siten tekniikka vaatii oletusarvoisesti eniten laatua pakettiverkolta.

¹ Structure-Agnostic Transport Over Packet

SAToP-pseudojohto voidaan määrittää manuaalisesti tai PWE3-kontrolliprotokollaa [47] käyttäen. [37]

SAToP-otsikko koostuu kontrollisanasta ja valinnaisesta RTP-otsakkeesta. RTP-otsake on ennen kontrollisanaa käytettäessä siirtoon UDP-protokollaa (User Datagram Protocol) ja sen perässä käytettäessä L2TPv3- (Layer 2 Tunneling Protocol) tai MPLS-protokollaa. RTP-otsakkeen järjestysnumeron pitää olla aina sama kuin vastaavan kontrollisanan järjestysnumero. RTP-otsakkeen 16-bittistä aikaleimaa voidaan käyttää aikatiedon siirtoon verkon yli. Käytännössä tästä ei ole juuri hyötyä ja RTP-otsake on jäänyt lähinnä historialliseksi jäänteeksi. [37]

SAToP:n pakettiverkkoon sidottu IWF paketoit säädetyn määrän TDM hyötydataa joka pakettiin. Molempiin suuntiin pseudojohtoa täytyy kulkea sama määrä tietoa. Siten paketin täyttämiseen kuluva aika täytyy olla vakio. Suositeltava hyötykuorman koko synkroniselle sarjaliikenteelle on 64 tavua ja E1:lle 256 tavua [24]. Kaikki sellaiset arvot väliltä 40–1550 tavua kelpaavat, jotka eivät johda pakettien pilkkoutumiseen. [37]

Reunalaitteiden täytyy sopia keskenään yhteen pakettiin laitettavien tavujen määrästä sekä RTP-otsakkeen käytöstä yhteydenmuodostuksen yhteydessä ja säilyttää asetukset koko pseudojohdon eliniän.. Käytettäessä IPv4:ää tulee asettaa Don't Fragment -lippu päälle. Mikäli RTP on käytössä, järjestysnumerot, liput ja aikaleimat lisätään SAToP-otsakkeeseen. SAToP-pseudojohdon palvelun määrittävä otsake ja pakettiverkon tunnelointiotsakkeet lisätään hyötykuorman päälle ja paketit siirretään pakettiverkon yli. Rakennetta voi tarkastella aiemmasta kuvasta 20.

Vastaanottopään IWF:n tulee sisältää viivepuskuri, johon vastaanotettu TDM-data tallennetaan ennen toistoa fyysiselle TDM-portille. Kontrollisanan järjestysnumeroa käytetään kadonneiden ja epäjärjestyksessä saapuneiden pakettien havaitsemiseen. IWF voi uudelleenjärjestää väärässä järjestyksessä saapuneita paketteja. Ne joita ei voida järjestää, tulee tuhota ja käsitellä kadonneina.

Mikäli saapuneessa paketissa on kontrollisanan L-bitti päällä, tulee koko hyötykuorma korvata ykkösillä häiriön merkiksi. Kadonneen paketin hyötykuorma täytyy korvata korvikedatalla, joka voi olla paikallisesti säädettävissä esimerkiksi jonoksi ykkösiä. Ennen pseudojohdon luontia ja sen purun jälkeen tulee IWF:n lähettää TDM-portille "kaikki ykkösiä" bittijonoa. Vastaanottavan pään IWF jatkaa tässä välitilassa, kunnes puskurissa on riittävästi paketteja, tyypillisesti 50 % kapasiteetista tai määritetty aika pseudojohdon luonnista on kulunut. Tämän jälkeen siirrytään normaalitilaan, jossa IWF tallentaa pseudojohdolta tulevaa dataa puskuriin ja toistaa sitä kellon tahdin mukaisesti TDM-piirille. Lisäksi on mahdollista siirtyä erilaisiin virhetiloihin. [37]

5.6.2 Rakennetietoinen aikajakokanavoitu piiriemulaatio pakettiverkoissa (CESoPSN) ²

CESoPSN-kehystä käytetään paketoimaan rakenteellisia NxDS0 (Nx64 kbps) TDM-yhteyksiä. NxDS0 piirien emulointi säästää kaistaa pakettiverkossa ja mahdollistaa kanavien keräämisen yhdelle yhteydelle ja hajautetut ristikytentäsovellukset. Verkkoon liitetyt asiakaslaitteet eivät ole yhtä alttiita pakettihukalle kuin SAToP:a käytettäessä. Tekniikka on määritelty IETF:n standardissa RFC 5086. [38]

Protokolla on suunniteltu siten, että tietyllä pseudojohdolla TDM-dataa kulkee kiinteä määrä per paketti. Peräkkäiset bitit täyttävät jokaisen hyötykuorman tavun aloittaen merkityksellisimmistä bitistä kohti vähiten merkityksellistä, mikä säilyttää tavujen kohdistuksen rakenteiden välillä. Tavujen järjestys on sama kuin vastaavassa

² Structure-Aware Time Division Multiplexed Circuit Emulation Service over Packet Switched Network

TDM-portissa. Tämä yksinkertaistaa kadonneen paketin käsittelyä, joka voidaan hoitaa täyttämällä tila samankokoisella täytopaketilla. [38]

Päästä-päähän viive on kiinteä riippumatta emuloidun palvelun bittinopeudesta. Kaikkien toteutusten tulisi tukea paketoinnin latenssia välillä 1-5 millisekuntia. Säädetävissä toteutuksissa latenssiparametrin granulariteetin pitää olla 125 mikrosekuntia. Mikäli signaalointitietoa pitää siirtää laitteiden välillä, se tulee suorittaa erillisillä signaalointipaketeilla ilman että TDM dataa kuljettavat paketit tai niiden käsittely muuttuvat. [38]

CESoPSN-otsakekentän täytyy sisältää kontrollisana ja se voi sisältää myös RTP-otsakkeen. RTP-otsakkeen sijaintiin pätevät samat säännöt kuin SAToP tapauksessa. Jos RTP-otsaketta käytetään datapaketeissa, sitä täytyy käyttää myös signaalointipaketeissa. [38]

Molempiin suuntiin pseudojohtoa täytyy kulkea sama määrä tietoa eli paketin täyttämiseen kuluva aika täytyy olla vakio. Reunalaitteiden täytyy sopia keskenään yhteen pakettiin laitettavien tavujen määrästä yhteydenmuodostuksen yhteydessä ja säilyttää asetus koko pseudojohdon eliniän. Kaikki sellaiset arvot kelpaavat, jotka eivät johda pakettien pilkkoutumiseen. Paketin koko ei voi ylittää polun suurinta siirrettävän yksikön kokoa (Maximum Transmission Unit, MTU) kahden reunalaitteen välillä, jotka terminoivat kyseisen pseudojohdon. [38]

Pseudojohdot voivat kuljettaa signaalointitietoa erillisissä paketeissa tai TDM-pakettien yhteydessä. Jos ne kulkevat samoissa paketeissa, ensimmäiset eivät vaikuta jälkimmäisten määrään. Signaalointipaketit tulisi kuljettaa sitä varten varatuissa pseudojohdoissa, mutta niitä voidaan kuljettaa myös hyötykuorman joukossa. [38]

CESoPSN:n täytyy tasata perusrakenteet paketin hyötykuorman rajoihin rakenteen siirtämiseksi pakettiverkon yli. Siitä seuraa, että ensimmäisen rakenteen tulee alkaa heti paketin hyötykuorman alusta ja TDM-datan määrän täytyy olla perusrakenteen koon monikerta. Toteutuksesta riippumatta CESoPSN-pakettien täytyy käyttää omia sekvenssinumeroita kontrollisanassa ja asettaa kontrollisanan liput arvoihin L = '0', R = '0' ja M = '11'. Kaksi ensimmäistä kertovat, että virheitä ei ole ja M on asetettu varattuun arvoon, jolla ei ole erityistä merkitystä. [38]

Paketointiviiveen, aikavälien lukumäärän ja hyötykuorman suhde seuraa kaavaa 1:

$$L = 8 * N * D \quad (1)$$

- L on paketin hyötykuorman koko tavuina
- N on 64 kbit aikavälien lukumäärä (1-32) kehyksessä.
- D on paketointiviive millisekunteina

Palvelu tuottaa 8000 rakennetta sekunnissa, joissa on N tavua täytettynä vastaavien NxDS0 kanavien tiedolla. CESoPSN toteutuksien täytyy tukea taulukossa 2 esitettyjä paketointiviiveen arvoja. Muiden hyötykuorman kokojen tuki on valinnaista.

Taulukko 2 CESoPSN-palvelun aikavälien, paketointiviiveiden ja hyötykuorman suhde

Aikavälien lukumäärä N	Paketointiviive D	Hyötykuorman koko L
1	8 ms	64 B
2-4	4 ms	32 x N B
5-32	1 ms	8 x N B

Käytettäessä verkkoalustana IP-verkkoa, vastaanottajan UDP-portti toimii arkkitehtuurisesti pseudojohdon tunnisteena erottaen ne toisistaan. Kohdeportti yhdessä lähettäjän ja vastaanottajan IP-osoitteiden kanssa määrittää yksilöllisesti yhden pseudojohdon lähettäjältä vastaanottajalle. UDP-portit täytyy manuaalisesti asettaa pseudojohdon molempiin päihin väliltä 49152–65535. UDP-pohjaiset pseudojohdot voivat aiheuttaa ongelmia ympäristöissä, joissa on käytössä porttimuunnosta suorittavia laitteita, kuten palomureja. [38]

5.6.3 RAD:n aikajakokanavointi pakettiverkoissa (TDMoIP) ³

TDMoIP on israelilaisen RADin kehittämä protokolla, joka on ollut markkinoilla vuodesta 1999. Samaa lyhennettä saatetaan käyttää myös yleisenä nimityksenä mistä tahansa piiriemulointiratkaisusta, mikä voi aiheuttaa sekaannuksia. TDMoIP tukee nimestään huolimatta verkkoja UDP/IP, L2TPv3 over IP, MPLS, sekä puhdas Ethernet. [40]

Käytössä on kaksi algoritmia TDM-liikenteen sovittamiseksi paketti-liikenteeseen, yksi tasanopeuksiselle ja toinen vaihtelevanopeuksiselle liikenteelle. Ensimmäisestä käytetään nimitystä piiriemulaatio ja siinä hyödynnetään luvussa 5.4.2.2 käsiteltyä rakenteen osoitusta. Piiriemulaatiota käytetään tilanteissa, joissa TDM on rakenteeton, rakenteellinen, mutta kanavaton tai kaikki kanavat ovat käytössä yhtä aikaa. Mikäli vain osa kanavista on käytössä yhtä aikaa, käytetään vaihtelevanopeuksista algoritmia, mikä mahdollistaa vain aktiivisten kanavien siirron säästäten näin kaistaa. Tähän tarkoitukseen käytetään aiemmin luvussa 5.4.2.3 käsiteltyä rakenteen uudelleenjärjestelyä ja siitä käytetään nimitystä silmukkaemulaatio. [40]

TDMoIP lainaa ATM-tekniikan sovituspötköliä AAL1 ja AAL2. Vaikka AAL-protokollat on alkujaan tehty ATM- käyttöön, niitä voidaan hyödyntää kaikessa vakio- tai vaihtelevanopeuksisten kanavien siirrossa pakettiverkossa. Uudelleenkäyttö myös helpottaa yhteensopivuutta olemassa olevien verkkojen kanssa. Piiriemulaatiossa TDMoIP käyttää vakionopeuksista AAL1:tä ja silmukkaemulaatiossa vaihtelevanopeuksista AAL2:ta. AAL1:ta täytyy käyttää kun TDM-sidottu IWF tarvitsee täsmällistä ajallista tarkkuutta esimerkiksi kellon edelleenjakeluun. AAL2:ta pitäisi käyttää kun kaistaa halutaan säästää ja sitä voidaan käyttää kun tiedetään puhekanavien käytön määrän vaihtelevan paljon. Lisäksi on määriteltä kolmas toimintamuoto HDLC-pohjaisen yhteiskanavamerkinannon kuljettamiseen TDM kanavassa. [40]

5.6.4 Yhteenveto piiriemulaatiostandardeista

TDMoIP on itsenäinen protokolla, joka pystyy hoitamaan kaikki yhteystyypit samalla tekniikalla, mutta se on lähinnä yhden laitevalmistajan tukema. Sen vahvuuksiin kuuluu yhteensopivuus ATM:n kanssa ja tuki joustavalle kanavamäärälle. Kiinteän kehyskoon vuoksi se ei aina ole hyötysuhteeltaan paras ratkaisu.

CESoPSN ja SAToP ovat laajalti tuettuja laitevalmistajien toimesta ja ne tukevat ominaisuuksiensa puolesta toisiaan. SAToP hoitaa rakenteettoman siirron ja CESoPSN kanavoidut, rakenteelliset yhteydet. CESoPSN tarjoaa kiinteän päästä-päähän viiveen, mutta kanavamäärän täytyy olla kiinteä koko palvelun elinajan. Paketointiviive voi olla TDMoIP:aa pienempi johtuen säädettävästä kehyskoosta. SAToP on yksinkertaisin ja hyötysuhteeltaan paras, mutta toisaalta eniten altis pakettiverkon aiheuttamille virheille.

³ Time Division Multiplexing over IP

Nämä standardit eivät ota kantaa synkronoinnin toteutukseen tai tietoturvakysymyksiin. Taulukkoon 3 on kerätty tiivistetty yhteenveto kolmesta käsitellystä emulaatiostandardista.

Taulukko 3 Yhteenveto IETF:n pseudojohtostandardeista

	TDMoIP	CESoPSN	SAToP
TDM palvelun tyyppi	-Kehystetty -Kehyksetön -Kanavoitu	-Kehystetty -Kanavoitu	-Kehyksetön -Kanavoimaton
Hyödyt	-Kaikki TDM-palvelut yhdellä protokollalla -HDLC tuki -signaalointitiedolle -Joustava kanavamäärä (AAL2)	-Pienempi paketoitiviive kuin TDMoIP useilla 64k aikaväleillä -Kiinteä päästä-päähän viive	-Paras hyötysuhde -Pieni viive -Joustava pakettikoko
Haitat	-Suurempi viive useita aikavälejä siirrettäessä -48 tavun kehyksien vuoksi (AAL1)	-Ei tukea kehyksettömälle palvelutypille -Kiinteä pakettikoko koko siirron ajan	-Herkempi pakettihukalle ja uudelleenjärjestymiselle -Soveltuu vain todella luotettavaan verkkoon

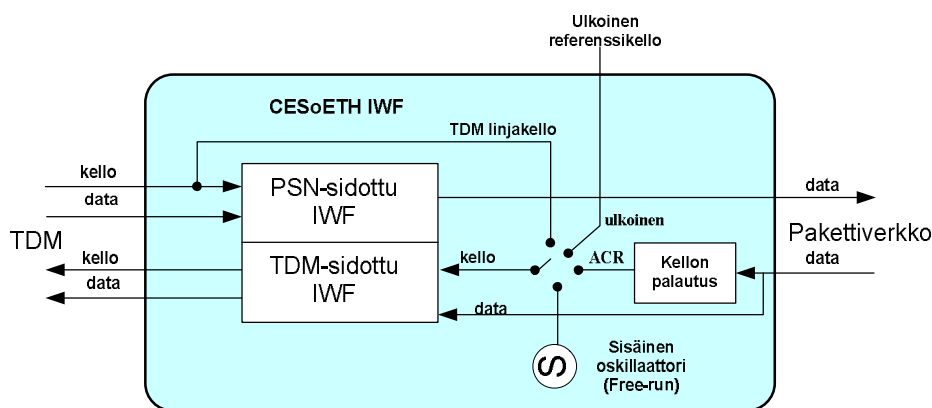
6 Kellojen synkronointi pakettiverkoissa

Pakettiverkot ovat luonteeltaan synkronoimattomia, eivätkä siten pysty tarjoamaan vakiobittinopeutta kuten piirikytkentäiset TDM-verkot. TDM-palvelut vaativat toimiakseen samassa tahdissa olevia kelloja molemmissa päissä pakettiverkkoa. Paketit saapuvat kuitenkin perille satunnaisen viiveen saattelemana. Tästä ilmiöstä käytetään nimitystä pakettiviiveen vaihtelu (Packet Delay Variation, PDV), joka vastaa piirikytkentäisten verkkojen taajuusvaihtelua. [10]

Viiveen vaihtelu on synkronoinnin toteutuksen kannalta suurin ongelma pakettiverkoissa. Vaihtelua voidaan kompensoida puskuroimalla saapuvat paketit, mutta alkuperäisen lähetyksen puuttuessa ei voida määrittää, millä aikavälillä paketteja pitäisi toistaa puskurista ulos. Tästä johtuen TDM-kehysten fyysisen tason synkronointitietoa ei voida hyödyntää. Molemmin puolin pakettiverkkoa tarvitaan yhteys referenssikelloon, jonka perusteella kellot voidaan synkronoida. [10]

ITU:n suositus G.8261 käsittelee synkronointia pakettiverkoissa, erityisesti Ethernetissä, keskittyen TDM-signaalien taajuussynkronointi-informaation siirtoon. Siirrettäessä TDM-signaalia pakettiverkon yli, tulee pakettiverkosta ulostulevan liitännän signaalitason vastata TDM-verkolle asetettuja laatuvaatimuksia. Tämä on ratkaisevaa, jotta yhteensopivuus TDM-laitteiden kanssa säilyy. Suosituksesta löytyy laitteiden vähimmäistoleranssi jitterille ja wanderille paketti- ja TDM-verkkojen rajapinnassa perustuen vanhempiin televerkon suosituksiin. Suositus kertoo myös, milloin tulisi käyttää mitään erilaisista synkronointitavoista. Fyysisellä tasolla suositus käsittelee vain IEEE 802.3 mukaisia Ethernet-tyyppisiä. [23]

Kellojen tahdistuksesta verkkojen rajapinnassa huolehtii aiemmin referenssiarkkitehtuurin yhteydessä luvussa 5.2 esitelty yhteensovitusfunktio IWF. Laitetasolla IWF sijaitsee usein reitittimessä, josta löytyy molempia verkkoja tukevat liitännät. Kuvassa 21 on esitetty läpileikkaus Metro Ethernet Forumin määritysten mukaisen yhteensovitusfunktion kellotusmahdollisuuksista, joita ovat linjakello, ulkoinen kellosignaali, adaptiivisesti palautettu kello, sekä laitteen sisäinen kello. Vasen puoli on yhteydessä TDM-verkkoon ja oikea puoli pakettiverkkoon.



Kuva 21 CESoETH yhteensovitusfunktion synkronointivaihtoehdot [33]

6.1 Piiri- ja pakettikytkentäisten verkkojen erot

Pakettiverkot ovat luonteeltaan hyvin erilaisia verrattaessa perinteisiin piirikytkentäisiin verkkoihin. Tärkeimmät ongelmia mahdollisesti aiheuttavat ilmiöt ovat pakettiverkossa esiintyvät viive, viiveen vaihtelu, bittivirheet, sekä pakettihukka. Piirikytkentäisissä verkoissa voi esiintyä bittivirheitä, mutta tieto ei koskaan katoa täysin siirron aikana. Bittivirheet voivat johtaa pakettihukkaan paketin hylkäyksen vuoksi. Pakettihukasta seuraa bittivirhepurske TDM-liikenteeseen. Se vuorostaan vaikuttaa suosituksessa G.826 määriteltyjen suorituskykymittarien kuten virheellinen ja vakavasti virheellinen sekunti arvoihin. Nämä ovat yhteyden laatumääreitä, jotka käydään läpi myöhemmin luvussa 7.2. [23]

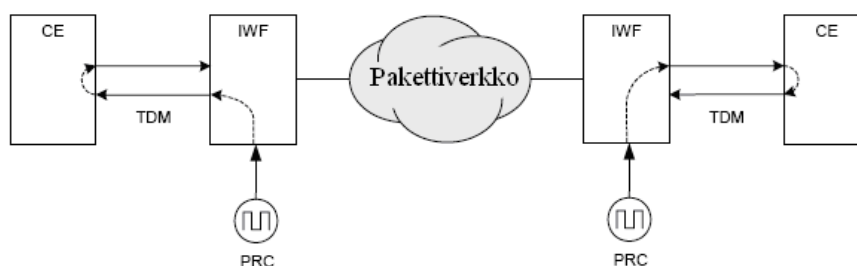
Vaikein ongelmista on viiveen vaihtelu, joka esiintyy adaptiivisesti palautetun kellosignaalin vaiheen ja taajuuden vaihteluna. Vastaanottopää hylkää paketin, jos PDV:n neutralointiin käytettävä vastaanottopuskuri ali- tai ylivuotaa. Tästä seuraa myös bittivirhepurske TDM-liikenteeseen ja virhe kellonpalautusalgoritmin toiminnassa.

6.2 Synkronointivaihtoehdot pakettiverkoissa

Pitkällä aikavälillä verkkolaitteen saapuvan palvelukellon taajuuden tulee olla sama kuin lähtevän palvelukellon taajuuden. Se ei kuitenkaan tarkoita wanderin kopioimista tulosta lähtöön. Tämän saavuttamiseksi voidaan käyttää neljää eri menetelmää, jotka ovat verkkosynkronoitu toiminta, differentiaalinen kellon palautus, asiakaslaitteille saatavissa oleva synkronointi, sekä adaptiiviset menetelmät. Käytännön verkkojen kannalta tärkein näistä on adaptiivinen kellonpalautus, joka vaatii referenssisignaalin vain toiseen päähän verkkoa. Pakettipohjaisten metodien suorituskyky ei ole kovin riippuvainen käytettävästä pakettiverkon tyypistä. Menetelmät on esitelty yksitellen seuraavissa aliluvuissa.

6.2.1 Verkkosynkronoitu toiminta

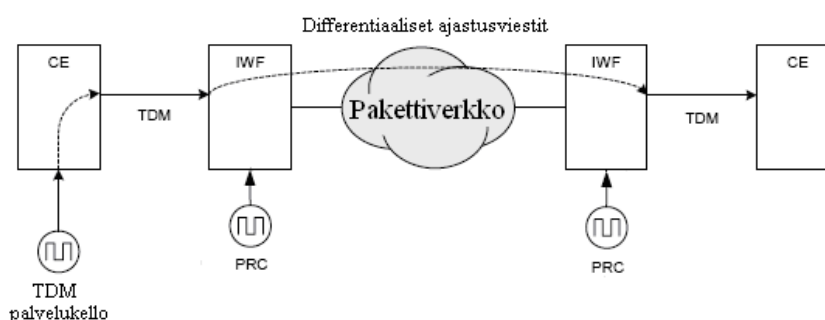
Verkkosynkronoitu toiminta viittaa tapaukseen, missä PRC:n jäljitettävissä oleva referenssisignaalin lähde on saatavilla molemmiin puolin pakettiverkkoa. Asiakslaitteet (Customer Equipment, CE) ottavat kellonsa IWF:ilta, jotka ovat yhteydessä synkronointiverkkoon. Tämä menetelmä ei säilytä asiakslaitteen palvelukelloa. Yleensä asiakslaitte sijoittuu pakettiverkon taakse siten, ettei sinne tule muita yhteyksiä, joita pitkin kellosignaali voitaisiin toimittaa. Poikkeuksena on tilanne, jossa yhdelle tukiasemapaikalle tulee sekä TDM-, että Ethernet-yhteys. Tällöin kello voidaan tuoda TDM-yhteyttä pitkin. Menetelmä on havainnollistettu kuvassa 22. [23]



Kuva 22 Verkkosynkronoitu toiminta

6.2.2 Differentiaalinen kellon palautus

Differentiaalista kellon palautusta (Differential Clock Recovery, DCR) käytettäessä molemmilla pseudojohdon päätepisteillä on yhteys referenssikelloon kuten verkkosynkronoidussa toiminnassakin. Ero asiakaslaitteen palvelukello ja IWF:n verkkokellon välillä koodataan lähtöpäässä ja lähetetään pakettiverkon yli. Palvelukello palautetaan pakettiverkon vastapään IWF:ssä käyttäen hyödyksi yhteistä referenssikelloa ja verkon yli kuljetettua aikaerotietoa. Tämä menetelmä voi säilyttää palvelukellon sietäen hyvin viivettä, viiveen vaihtelua ja pakettihukkaa. Menetelmä on kuitenkin kallis, koska tarvitaan useampia referenssilähteitä. Menetelmä on havainnollistettu kuvassa 23. [23]



Kuva 23 Differentiaalinen kellon palautus

ATM-tekniikassa käytetty SRTS-menetelmä (Synchronous Residual Time Stamp) on esimerkki DCR-toteutuksesta. CESoPSN-emulointitekniikka sisältää valinnaisen tuen differentiaaliselle ajastukselle.

6.2.3 Synkronoidut asiakaslaitteet

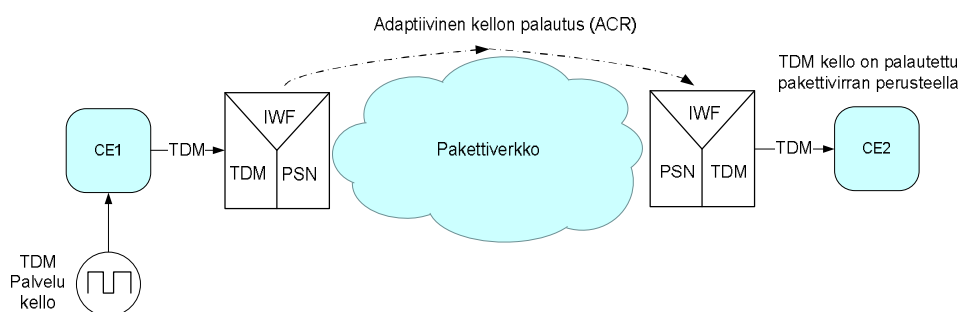
Mikäli molemmilla asiakaslaitteilla on yhteys referenssikelloon, ei ole tarvetta tehdä kellon palautusta ja tilanne on mahdollisimman yksinkertainen. Molemmat voivat tahdistaa signaalin, joka lähtee IWF:stä. Yksi toteutusvaihtoehto on IWF:n ns. silmukka-ajastus. Tällainen tilanne voi olla mahdollinen pakettiverkon yhdistäessä kaksi eri piirikytkentäistä verkkoa. Laitteilla voi olla myös eri kellosignaalin lähteet. Menetelmä on havainnollistettu kuvassa 24. [23]



Kuva 24 Kellosignaali on saatavilla asiakaslaitteille molemmissa päissä verkkoa

6.2.4 Adaptiivinen kellon palautus

Adaptiivinen kellon palautus (Adaptive Clock Recovery, ACR) on pakettiverkon yli toimiva synkronointiratkaisu. ACR-algoritmin toiminnalle oleellista on pakettien tasainen saapuminen, mitä edistetään puskuroinnilla vastaanottopäässä. Menetelmä ei vaadi verkon laajuista synkronointisignaalia, mutta se on herkkä verkon häiriöille ja viiveille toimiessaan OSI-mallin linkkikerroksella. Reunalaitteiden välillä ei tarvita erityistä tukea tekniikalle. Yksi referenssikello riittää, mikä tekee menetelmästä edullisemman kuin differentiaalimenetelmä. ACR voi säilyttää palvelukellon vastapäätä. Algoritmit ovat valmistajakohtaisia ja laitevalmistajien keskinäisen kilpailun väline. Menetelmä on havainnollistettu kuvassa 25. [23]



Kuva 25 Adaptiivinen kellon palautus pakettiverkon yli

Aikatieto kuljetetaan hyötytiedon yhteydessä ilman erillisiä ajastuspaketteja. Yhteyden alkupäässä luodaan paketti, johon talletetaan usein aikaleima tai järjestysnumero. Kellon palautukseen vastaanottopäässä on useita menetelmiä, joista tyypillisimpiä ovat puskurin täyttöasteeseen perustuva menetelmä, aikaleimojen vertailumenetelmä ja minimiviiveisen paketin menetelmä.

Ensimmäisessä menetelmässä vastaanottava laite säätää sisäistä kelloansa siten, että puskurin täyttöaste pysyy mahdollisimman vakiona. Toisessa menetelmässä lähettävän puolen kello voidaan päätellä vastaanotettujen pakettien aikaleimojen välisestä erotuksesta. Jos vastaanottaja laskee enemmän aikaa kahden paketin välille kuin aikaleimat kertovat, sen täytyy hidastaa sisäistä kelloansa. Vastaavasti lasketun aikaeron ollessa lyhyempi, täytyy sisäistä kelloa nopeuttaa.

Tässä työssä käytettävä Alcatelin reitin hyödyntää paketin minimiviiveeseen perustuvaa menetelmää. Verkon aiheuttamaa viivettä arvioidaan tutkimalla vastaanotettuja paketteja kahden sekunnin aikaikkunassa. Eniten aikaa puskurissa viettänyt paketti on kohdannut vähiten viiveenvaihtelua, mistä voidaan päätellä verkon minimiviive. Näin voidaan toistaa puskurin sisältöä ulos mahdollisimman tasaisesti tunnetun viiveen perusteella ja siten vähentää verkosta aiheutuvaa kohinaa. [48]

Pakettiverkoissa voi tapahtua joukko häiriöitä, joiden johdosta pakettivirta katkeaa tai viiveisiin tulee vaihteluita. Näitä ei yleensä voida kompensoida PLL:lla. Seuraavaksi on listattu muutama tällainen ongelma.

Mikäli pakettien reitti vaihtuu, se tarkoittaa muutosta viiveessä. PLL näkee tämän askeleena vaiheessa ja pyrkii kompensoimaan sen. Esimerkiksi 10 μ s muutos minimiviiveessä näkyy 10 μ s vaihepiikkinä palautetussa kellossa. [49]

Saadakseen minimiviivetiedon algoritmi tarvitsee yhden paketin per määritelty tarkastelujakson pituus. Ongelmia seuraa kun peräkkäisiä paketteja katoaa. Tällöin vastaanottopuskuri voi tyhjentyä eli alivuotaa, mistä seuraa virheitä. Mikäli alivuotoa ei käsitellä oikein, ensimmäisen vuodon jälkeisen paketin käyttämä aika

vastaanottopuskurissa ei ole verrannollinen verkon viiveeseen. Arvio verkon viiveestä muuttuu siten epätodelliseksi ja saa aikaan vaiheen hyppyjä kellon ulostulossa. [49]

Mikäli linkki on pidempään poikki, täytyy löytyä toinen keino tuottaa kellosignaalia. Yksi keino on laskea viiveestä pitkän ajan keskiarvo, josta käytetään nimeä holdover-arvo tai ylläpitoarvo. Kunnolla tehtynä tämä ei heiluta kellon ulostulon vaihetta merkittävästi aikana jolloin paketteja ei vastaanoteta. Työssä käytetyn laitteen kriteerit ylläpitoarvoon siirtymiselle ovat täydellinen pakettihukka, vähintään 18 kadonnutta pakettia 2000:sta, sekä yli 30 μ s muutos vaiheessa verrattuna edelliseen aikaikkunaan. [48]

Pakettien järjestysnumeroilla voidaan todeta pakettien saapumisjärjestyksen oikeellisuus. Muutoin kaksi eri reitettä tullutta pakettia voisivat saapua väärässä järjestyksessä, sekoittaen hyötykuorman eheyden. Epäjärjestyksestä seuraisi myös väärä arvio minimiviiveestä [49]. Vastaanottopuskuri voi yrittää korjata epäjärjestyksiä. Kaksi samaa järjestysnumeroa kertoo paketin kahdentumisesta matkan varrella. Toinen voidaan tällöin poistaa turhana.

6.2.5 IEEE 1588 tarkan ajanmäärityksen protokolla (PTP) ⁴

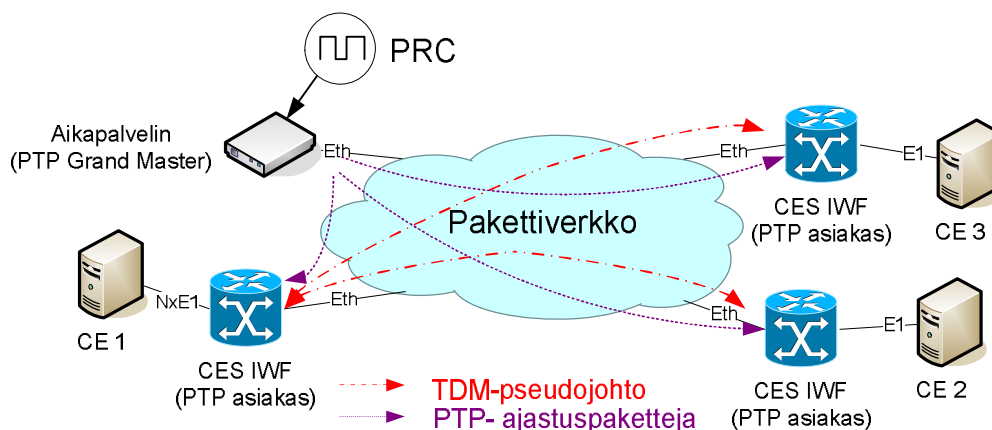
Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) on standardoinut master-slave tyyppisen pakettipohjaisen verkon synkronointitiedon siirtoon tunnuksella IEEE-1588 [50]. Useimmiten tekniikasta käytetään nimitystä PTP (Precision Timing Protocol). Se on alun perin suunniteltu automaatiokäyttöön tehdasympäristöjen pieniin verkkoihin, mikä voi rajoittaa sen käyttöä maanlaajuisissa verkoissa.

PRC-tasoisesta kellosignaalista luodaan aikaleimoja paketteihin, joita jaetaan aikapalvelimelta sitä seuraaville asiakaslaitteille. Nämä ovat tyypillisesti piiriemuloidun verkon IWF-laitteita. Yksi asiakaslaite voi seurata kahta aikapalvelinta, joista se valitsee kättelymenetelmällä paremman tarjoten näin vikasietoisuutta. Standardi lupaa alle mikrosekunnin tarkkuuksia. Aikapalvelimen ja asiakaslaitteen välissä olevilta laitteilta ei vaadita yhteensopivuutta tekniikan kanssa, joten sen käyttö onnistuu olemassa olevissa verkoissa. [10]

Menetelmä on periaatteeltaan adaptiivinen, eikä siten vaadi verkon laajuista referenssisignaalia. Se toimii OSI-mallin sovelluskerroksella. Aikapalvelin lähettää aikaleimallisia Sync-viestejä asiakaslaitteille ryhmälähetyksenä. Suorituskyky on riippuvainen verkkotopologiasta ja pakettiverkon viiveen vaihtelusta, mutta PTP vaatii vähemmän kaistanleveyttä kuin ACR. Pakettihukka ei ole vakava ongelma, koska vastaanottaja määrittää ajan keskiarvoistamalla useamman saapuneen paketin perusteella. Pitkän katkon aikana voidaan siirtyä ylläpitotilaan, kuten perinteistenkin kellojärjestelmien tapauksessa. [50]

PTP:aa voidaan käyttää sekä taajuustiedon, että kellonajan välittämiseen. Versiossa 2 viestit ovat huomattavasti pienempiä kuin aiemmin ja päivityksiä voidaan tehdä tiheämmin. PTP on edelleen tutkimuksen alaisena ja teletekniikkaan sopivia parametrioita ja asetuksia on kerätty niin kutsuttuihin telecom profiileihin, jotka tullaan julkaisemaan tulevaisuudessa taajuussynkronoinnin osalta ITU:n suosituksena G.8265.1. Kuvassa 26 on esitetty pseudojohtototeutus, jossa IWF-laitteet saavat kellosignaalin PTP-viesteinä aikapalvelimelta. [10]

⁴ Precision Timing Protocol



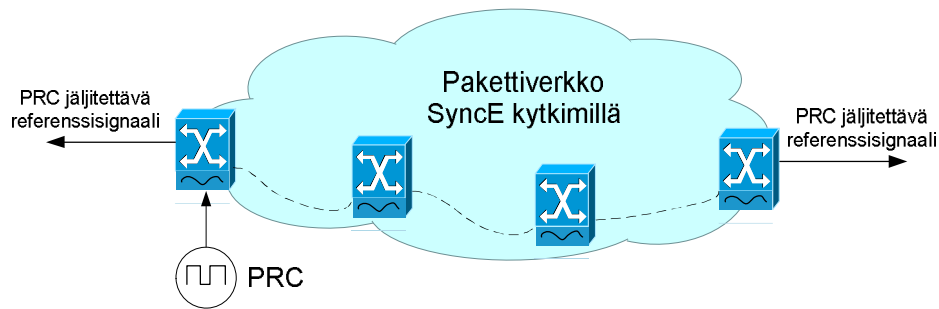
Kuva 26 PTP-viestien välitys pakettiverkossa, jossa emuloidaan piirikytkentäisiä yhteyksiä

6.2.6 Synkroninen Ethernet (SyncE)

Perinteinen Ethernet-verkko toimii toisistaan riippumattomien laitekellojen varassa tarkkuudella ± 100 ppm, mikä ei riitä synkronisten palveluiden tarpeisiin. Tarkka synkronointi ei ole ollut tarpeen, koska vastaanottaja lukittuu lähettäjän ajastukseen kehyskohtaisesti kuten asynkronisessa sarjaliikenteessä. Synkroninen Ethernet (SyncE) on perinteisen Ethernetin pohjalta kehitetty uudehko tekniikka, joka mahdollistaa master-slave tyyppisen kellohierarkian toteutuksen mukautetulla Ethernetin fyysisellä kerroksella täyttämällä kelloille asetetut tarkkuusvaatimukset. SyncE on määritelty ITU:n suosituksissa G.8261, G.8262, G.8264, sekä G.781.

SyncE tekniikassa referenssikellosignaali voidaan jakaa pakettiverkon yli ilman, että se altistuu pakettiverkolle tyypillisille ongelmille. Menetelmä on pohjimmiltaan linjakelloa vastaava ja se tarjoaa pelkästään tarkkaa taajuussynkronointia tarkkuudella 4,6 ppm. SyncE signaalia voidaan käyttää pakettiverkon yli siirrettyjen TDM-palveluiden tahdistuksen palauttamiseen IWF:ssa tai tarjota suoraan tahdistussignaali verkkoon liitetuille asiakaslaitteille. Toimiakseen SyncE vaatii tukea kaikilta ketjuun kuuluvilta verkkolaitteilta, mikä rajoittaa sen hyödyntämismahdollisuuksia vielä oleellisesti. [23]

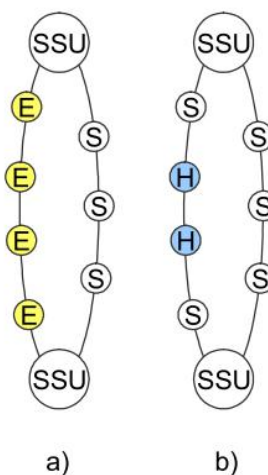
PRC:n jäljitettävissä oleva kellosignaali tuodaan Ethernet-kytkimen ulkoisen kellon porttiin. Synkronointifunktio käsittelee signaalia ennen ajastuksen liittämistä Ethernet-bittivirtaan. Useamman laitteen ketjussa signaali siirretään pakettiverkossa kytkimestä toiseen kuvan 27 esittämällä tavalla. SyncE on luonteeltaan kahden pisteen välinen tekniikka, jossa laitteet muodostavat ketjuja. Signaalia välittävien laitteiden on kyettävä palauttamaan synkronointi saapuvasta bittivirrasta, aivan kuten TDM-linjakellon tapauksessa. Tullessaan ulos Ethernet-verkosta on kellosignaali edelleen jäljitettävissä primäärireferenssikelloon. SyncE laitteet käyttävät synkronoinnin status viestejä (Synchronization Status Message, SSM) vaihtaakseen tietoa synkronoinnin tilasta [51].



Kuva 27 Master-Slave synkronointi synkronisen Ethernetin yli [23]

Synkronista Ethernet-verkkoa tukevasta kellosta käytetään nimitystä EEC (synchronous Ethernet Equipment Clock) [52]. Arkkitehtuurissa tehdään ero verkkokellon ja palvelukellon välillä. EEC viittaa verkkokelloon, jonka perusteella Ethernet-kytkin lähettää tietoa ulos. Synkronisessa Ethernetissä perinteiset Ethernet-palvelut ovat edelleen asynkronisia ja ne tahdistuvat palvelukellon mukaan. [12]

SyncE-laitteen täytyy kyetä yhteistoimintaan SDH-laitteiden kanssa, joissa on SEC -tyypin kello muodostaen osan kellosynkronointihierarkiasta. Kuvassa 28a on kaksi verrannollista synkronointiketjua SSU-yksiköiden välillä, joista toisessa on käytössä EEC-laitteita (symboli "E") ja toisessa SEC-laitteita (symboli "S"). Kuvassa 28b SEC-tyypin laitteiden ohella ketjussa on hybridilaitteita (symboli "H"), joista löytyy sekä STM-N että SyncE -liitännät. Kuvan esimerkissä voidaan käyttää STM-N liitäntää liittymään SDH-laitteisiin ja SyncE-liitäntää kahden hybridilaitteen välillä. [12]



Kuva 28 Kaksi synkronointiketjua toteutettuna erilaisilla verkkoelementeillä [12]

7 Mittausten teoria

Tässä luvussa käydään läpi luvun 8 mittauksiin liittyviä käsitteitä ja standardeja, jotta mittaustuloksia pystytään tuottamaan, käsittelemään ja ymmärtämään oikein. Luku keskittyy pääosin TDM-yhteyksien mittauksissa käytettyihin ITU:n määrittelemiін standardeihin. Näiden tietojen perusteella osataan valita oikeat asetukset mittalaitteelle verkon koon ja käytetyn kanavointijärjestelmän perusteella sekä lukea saatuja arvoja.

7.1 TDM hälytyssignaalit

Tässä luvussa käydään läpi tärkeimmät TDM-palvelun tilasta kertovat signaalit joita käytetään palvelun hallitsemiseen ja virhetilanteista tiedottamiseen. Näitä tietoja tarvitaan TDM-mittalaitteen ilmoittamien lukemien ymmärtämiseen ja mahdollisen vian etsintään.

Hälytykset ovat vastineita virheeseen linjalla tai E1-kehyksessä. Hälytyksiä on kolmea tyyppiä ja niitä syntyy kehyslukituksen (Loss of Frame Alignment, LFA), ylikehyslukituksen (Loss of Multi-Frame Alignment, LFMA) tai signaalin kadotessa (Loss Of Signal, LOS). LFA tilasta käytetään myös nimitystä out-of-frame (OOF). [53]

LMA- ja LFMA-tilaan päädytään, jos tulevan signaalin kehyskuviossa on virheitä. Tilaan siirtymiseen vaadittava bittivirheiden määrä riippuu kehystystyypistä. LOS on TDM-portin korkeimman luokan virhe, jossa saapuvaa signaalia ei havaita. Kriteerit LOS-tilaan siirtymisestä ja palautumisesta on määritelty suosituksessa G.775 desibelitasoina suhteessa signaalin nimellistasoon [54]. LOS hälytys kytkeytyy 2,5 sekuntia kestäneen LFA tilan jälkeen [54]. LOS voi johtua irrallaan olevasta kaapelista, kaapelivauriosta tai signaalin lähettävä vastapään laite voi olla poissa toiminnasta. [54]

Hälytyksen ilmoitussignaali (Alarm Indication Signal, AIS) ja vastapään vikailmoitussignaali (Remote Defect Indication, RDI) ovat vastauksia LOS-, LFA- ja LFMA-hälytyksiin. Nämä kaksi ovat signaaleista tärkeimmät. Niiden esiintyminen viittaa yleensä fyysisen tason ongelmiin yhteydessä. AIS:ia käytetään raportointiin piirin katkoksesta signaalin aktivoivan laitteen etupuoletta. Laite ilmoittaa näin viasta takanaan oleville laitteille, jotka vuorollaan kytkevät AIS:n päälle. Tyypillisesti käytetään pelkkää binääri "1"-bittijonoa, joka korvaa puuttuvat bitit ja pitää piirin toimintakuntoisena. [53]

RDI kytkeytyy päälle, kun laite on vastaanottanut tietyn määrän peräkkäisiä AIS-huomautuksia vastapäästä. RDI:lla raportoidaan vastapään katkoksista etupuoletta oleville laitteille. RDI kytkeytyy pois, kun AIS on ollut pois päältä tietyn aikaa. Nämä on määritelty tarkemmin suosituksessa G.775. [54]

7.2 Keskeiset määritelmät

ITU:n suositus G.821 määrittelee joukon TDM-verkkojen suorituskykyyn liittyviä termejä ja laatumittareita, jotka käydään läpi tässä luvussa.

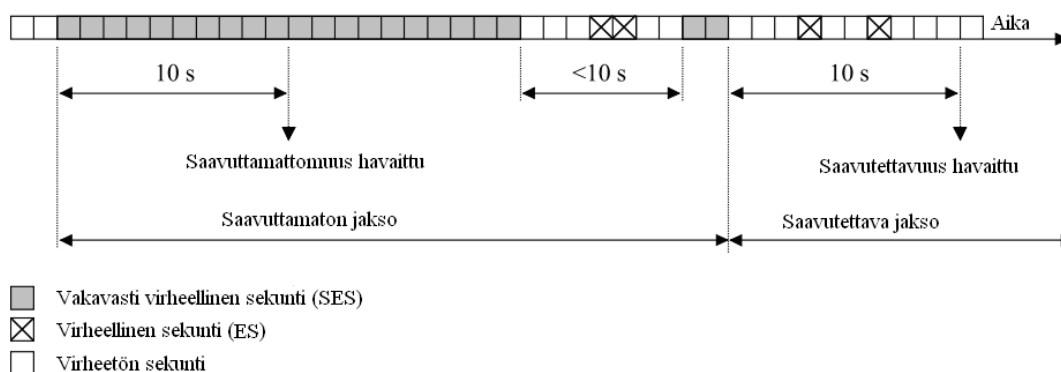
Lohko on jono bittejä siirtoyhteydellä, jotka kuuluvat samalle polulle. Lohkon koko voi vaihdella toteutuksittain, mutta suosituksessa käytetään kokoa 2048 bittiä E1-nopeudelle. Siten sekuntia kohti siirretään 1000 lohkoa. Lohkon eheyttä valvotaan virheiden tunnistuskoodilla kuten CRC (Cyclic Redundance Check). Bitti voi kuulua vain yhdelle polulle. Käytännössä polku on ryhmä kanavoituja yhteyksiä nopeusalueella 1,5-3500 Mbit/s. [55]

Poluille on määritelty virhetapahtumat virheellinen lohko (Errored Block, EB), virheellinen sekunti (Errored Second, ES) ja vakavasti virheellinen sekunti (Severely Errored Second, SES). EB on lohko, jossa on yksi tai useampi virheellinen bitti tai vähintään yksi häiriö, kuten AIS tai LOS. ES on sekunnin mittainen aikajakso, johon sisältyy yksi tai useampi virheellinen lohko. SES on sekunnin mittainen aikajakso, joka sisältää yli 30 % virheellisiä lohkoja tai vähintään yhden häiriön. SES on ES:n osajoukko. [55]

Virheellinen sekunti ja vakavasti virheellinen sekunti on määritelty polun lisäksi myös yhteyksille. ES on määritelty yhteyksille samalla tavoin kuin poluille. SES on yhteyksille sekunnin mittainen aikajakso, jonka bittivirhesuhde $\geq 1 \times 10^{-3}$ [55], virheellisiä lohkoja on yli 30 % [56] tai jonka aikana LOS tai AIS häiriö on havaittu.

Kaksi tärkeintä laatumittaria edellisiin perustuen ovat virheellisten sekuntien suhde (ESR) ja vakavasti virheellisten sekuntien suhde (SESR). ESR on määritelty virheellisten sekuntien suhteena koko mittausjakson pituuteen. SESR on vastaavasti vakavasti virheellisten sekuntien suhde koko mittausjakson pituuteen. Mittausajasta tulee lisäksi vähentää mahdolliset saavuttamattomissa olleet sekunnit, jolloin suhde kuvaa vain yhteyden saavutettavissa olevaa aikaa. Mikäli bittivirheet esiintyvät purskeina, määritelmä sallii suuremman virhesuhteen kuin yksittäisillä virheillä johtuen siitä, että yhden sekunnin aikavälille mahtuu useampi virhe, jotka eivät nosta ES-tapahtumien lukumäärää kuten yksittäiset virheet. Toisaalta purskeista syntyy helpommin SES-tapahtumia. Näitä tarkastellaan tarkemmin luvussa 7.4.

Yksisuuntaisen yhteyden katsotaan olevan saavuttamattomassa tilassa kymmenen peräkkäisen vakavasti virheellisen sekunnin (SES) jälkeen. Tätä lyhyemmät jaksot katsotaan kuuluvaksi saavutettavaan tilaan. Saavuttamattomissa olevan ajan katsotaan alkavan takautuvasti ensimmäisestä havaitusta SES:ta. Yhteys on jälleen saavutettavissa kymmenen peräkkäisen SES-vapaan sekunnin jälkeen, alkaen takautuvasti ensimmäisestä SES-vapaasta sekunnista. ES voi esiintyä tällä aikajaksolla. Määritelmiä on havainnollistettu kuvassa 29.



Kuva 29 Saavutettavuuden määrittäminen [57]

Kaksisuuntaisen yhteyden katsotaan olevan saavuttamattomissa kumman tahansa suunnan ollessa saavuttamattomassa tilassa. Saavutettavuus on määritelty saavutettavan ajan suhteena koko havainnointiajan pituuteen prosentteina. Havainnointiajaksi suositellaan yhtä vuotta. Tyypillinen TDM-palvelulle asetettu saavutettavuustavoite on 99,95 % [33]. Samasta asiasta voidaan käyttää myös termiä käytettävyys. [57]

7.3 Bittivirheiden havaitseminen

Bittivirhesuhde on matalan tason siirtolaitteiden tyypillinen laatuparametri, joka mittaa virheellisten bittien määrää suhteessa kaikkiin siirrettyihin bitteihin. Jotta bittivirheet voidaan havaita, täytyy tietää tarkalleen, mitä linjalle on lähetetty ja kyetä vertaamaan sitä vastaanotettuun bittivirtaan. Tämän johdosta mittauksia voidaan harvoin suorittaa verkossa todellisen liikenteen seassa, jonka rakennetta ei tunneta. Siitä on syntynyt tarve määritellä joukko toistettavia, mahdollisimman paljon oikeaa liikennettä muistuttavia bittijonoja testikäyttöön. [56]

ITU-T on määritellyt O.150-sarjan suosituksissa joukon pseudosatunnaisia bittijonoja, joilla voidaan suorittaa bittivirhemittauksia. Bittijonon pituus on tyypillisesti 2^N-1 bittiä. Mitä suurempi bittinopeus, sen pidempiä bittijonoja tulee käyttää. Yhteyden sietokyky bittinopeuden vaihtelulle vähenee nopeuden kasvaessa. 2048 kilobitin sekuntinopeudella ylärajaksi on määritetty 50×10^{-6} bittiä. Yleisesti käytetään yksikköä bitin miljoonasosa (bits per million, bpm), jolla ilmoitettuna arvo on 50 bpm. Tämän työn kannalta tärkeimmät bittijonot on esitelty taulukossa 4. [58]

Taulukko 4 Bittinopeudet, toleranssit ja suositellut pseudosatunnaiset bittikuviot [59]

Bittinopeus (kbit/s)	Kanavointi- järjestelmä	Bittinopeuden toleranssi	Bittijonon pituus
< 14,4	-	?	2^9-1
64, Nx64	DS0	?	$2^{11}-1$
2048	E1	$\pm 50 \times 10^{-6}$	$2^{15}-1$
8448	E2	$\pm 30 \times 10^{-6}$	$2^{15}-1$
34 368	E3	$\pm 20 \times 10^{-6}$	$2^{23}-1$
139 264	E4	$\pm 15 \times 10^{-6}$	$2^{23}-1$

Puhtaasti piiriemuloinnin testaamiseen keskittyvä uudempi MEF 18 standardi suosittelee käytettäväksi $2^{20}-1$ pituista pseudosatunnaista bittijonoa [34]. Tämän työn mittauksissa noudatettiin kuitenkin edellisen taulukon arvoja $2^{11}-1$ sarjaväyläiselle RS-232 liikenteelle ja $2^{15}-1$ E1-liikenteelle.

7.4 Suorituskykymittarien soveltaminen

ITU-T on määritellyt joukon suosituksia, joilla voidaan mitata siirtolaitteiden suorituskykyä. Ne määrittelevät terminologiaa, sekä laatu- ja saavutettavuustavoitteita. Yhteenvedon löytää suosituksesta G.820. Tämän työn kannalta tärkeimmät suositukset ovat G.821, G.826, sekä M.2100. Niiden tärkeimmät hyväksyttävyysskriteerit ovat virheellisten sekuntien suhde ja vakavasti virheellisten sekuntien suhde. Seuraavissa luvuissa käydään läpi näiden suositusten eroavaisuuksia.

ITU:n suositus G.821 bittivirheiden mittaukseen käsittelee yhteyksiä, jotka toimivat alle digitaalisen hierarkian perusnopeuden 2048 kbps. Tällä suosituksella ei voida tehdä mittauksia toiminnassa olevassa verkossa. G.821 tulee soveltaa vain yhteyksillä, joiden siirtolaitteet on suunniteltu ennen vuotta 2002. Alkuperäinen käyttökohde ovat olleet alle 64 kbps ISDN-yhteydet, mutta käyttö on sittemmin laajentunut [55].

Suositus G.826 käsittelee yhteyksiä, jotka toimivat alle perusnopeuden vuotta 2002 uudemmilla laitteilla, sekä kaikkia polkuja perusnopeudella ja sen yli. Yhteyksille mitataan bittivirheitä ja poluille lohkovirheitä. Mittaukset ovat mahdollisia myös toiminnassa olevassa verkossa, toisin kuin G.821 tapauksessa.

Suosituksen suora vertailu ei ole mahdollista, sillä virhetilanteet on määritelty hieman eri tavalla. Virhepurske saisi G.821:n mukaan aikaan joukon bittivirheitä, kun G.826 ilmaisisi mahdollisesti vain yhden virheellisen lohkon. Mikäli bittivirheet ovat sopivasti hajallaan ajan suhteen, jokainen niistä voi aiheuttaa virheellisen lohkon. G.826 vaatimukset voivat olla huomattavasti tiukemmat. [60]

Kaikki G.820-sarjan suositukset mittaavat pitkän aikavälin suorituskykyä ja vaativat siksi hyvin pitkiä testijaksoja. Suositus olisi 30 päivää, mikä on useimmiten käytännössä vaikeaa toteuttaa [55]. Tätä varten on otettu käyttöön M-sarjan suositukset, jotka on tarkoitettu ennen kaikkea uusien siirtolaitteiden käyttöönottovaiheen testaukseen. Ne sallivat myös lyhyet testausajat alkaen 15 minuutista, minkä johdosta se sopii parhaiten hyödynnettäväksi tässä työssä. PDH-laitteille tarkoitettu M.2100-suositus määrittelee mittarit ja tavoitteet virheille, ajastukselle ja saavutettavuudelle. M-sarjan vaatimukset ovat huomattavasti tiukemmat kuin G-sarjan, sillä kaikkien mittarien raja-arvot on puolitettu. Vertailu raja-arvoista on esitetty taulukossa 5. Arvot ovat suhdelukuja. [61]

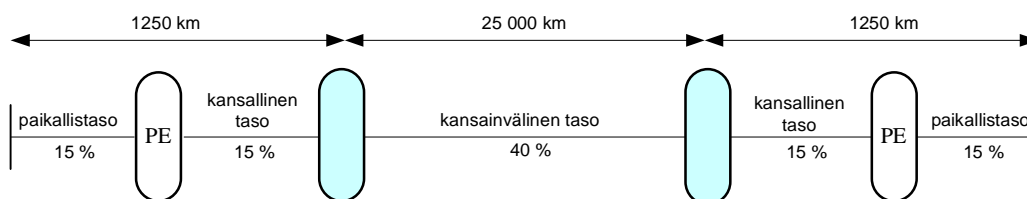
Taulukko 5 Suorituskykytavoitteiden raja-arvot suositusten G.826 ja M.2100 mukaan [60]

Siirtojärjestelmä	E1		E2		E3	
Suositus	G.826	M.2100	G.826	M.2100	G.826	M.2100
ESR	0,04	0,02	0,05	0,025	0,0765	0,03756
SESR	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001

Taulukon soveltamista käsitellään seuraavassa aliluvussa.

7.5 Suorituskykytavoitteiden mitoitus testiverkkoon

Suorituskykymittausten kuten ESR ja SESR raja-arvot on määritelty suosituksissa kansainväliselle hypoteettiselle referenssipolulle (Hypothetical Reference Path, HRP), jonka pituudeksi on määritelty 27500 km. Tämän johdosta tavoitteet pitää ensin skaalata sopivaksi omaan verkkoon. Referenssipolku on edelleen jaettu paikallisiin, kansallisiin ja kansainvälisiin osiin, joille on annettu tietyt painoarvot kuvan 30 mukaisesti. Paikallisen ja kansallisen tason rajaksi on määritelty puhelinverkossa paikalliskeskus ja pakettiverkoissa PE-laite, mutta kansallisen ja kansainvälisen tason rajaa ei ole määritelty yksiselitteisesti. Yhteysvälikohtaiset ajastusvirheet summautuvat päästä-päähän yhteydellä. [55]



Kuva 30 Suorituskykytavoitteiden jako osiin kansainvälisellä hypoteettisella referenssipolulla [55]

RS-232 yhteyksiä käyttävät laitteet ovat ajalta ennen vuotta 2002, joten raja-arvot johdetaan suosituksen G.821 mukaisesti. Yhtä paikallista ja kansallista tasoa kohti on käytössä yhteensä 30 prosenttia kokonaisvirhebudjetista, joka jakautuu tasan niiden välillä. Tässä tarkastelussa on järkevää rajoittaa paikallistasolle laboratorioverkon pienistä etäisyyksistä ja pienestä laitemäärästä johtuen. Tälle tasolle on varattu 15 % per yhteyden pää. Koko yhteydelle sallittu ESR arvo on 0,08. Laskemalla $0,15 \cdot 0,08$, saadaan ESR raja-arvoksi paikallistasolle 0,012.

Vastaavasti SESR raja-arvo koko yhteydelle on 0,002. Se on edelleen jaettu kahtia kiinteään osaan ja vaihtelevia olosuhteita kuvaavaan osaan, mitkä kuvaavat vuoden heikointa kuukautta kansallisella ja kansainvälisellä tasolla. Etäisyysriippuvainen osa huomioidaan vain kansallisella ja kansainvälisellä tasolla. Laskemalla $0,15 \cdot 0,001$ saadaan paikallistason kiinteäksi SESR raja-arvoksi 0,00015. Kääntämällä suhteet ajaksi saadaan rajoiksi 21 virheellistä sekuntia ja nolla vakavasti virheellistä sekuntia puolen tunnin mittausajalla. Yhteenvedo on esitetty taulukossa 6.[55]

Taulukko 6 Suorituskykytavoitteet referenssipolun eri tasoille G.821 mukaan

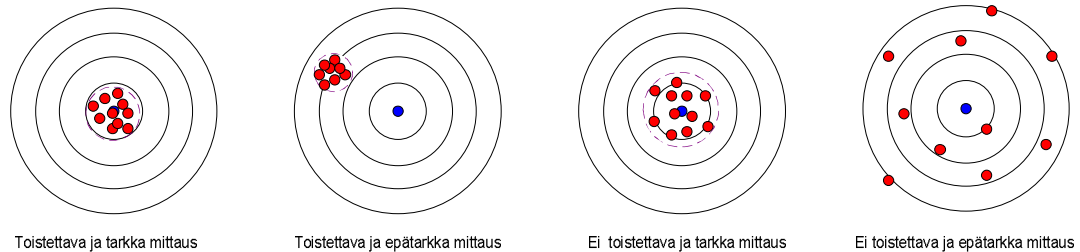
Suorituskyky-tavoitteet	Referenssi-polku	Kansainvälinen taso	Kansallinen taso	Paikallis-taso
Suhteellinen osuus:	100%	40%	15%	15%
ESR	0,08	0,032	0,012	0,012
SESR (kiinteä)	0,001	0,0004	0,00015	0,00015
SESR (vaihtelevat olosuhteet)	0,001	0,0004	0,00015	-

Haettaessa raja-arvoja E1-yhteyksille, tulee käyttää uudempaa G.826 suositusta. Siinä referenssipolun tasojen välisiä prosentiosuuksia on muutettu siten, että paikallistaso ja kansallinen taso saavat molemmat 17,5 % per yhteyden pää ja kansainväliselle tasolle jää 30 %. Lisäksi ESR raja-arvo on puolitetty arvoon 0,04 ja SESR on kiinteä 0,002. Kansalliselle tasolle prosentteja laskettaessa otetaan huomioon lisäksi etäisyysidonnainen osa, joka tuo yhden prosentin lisää jokaista alkavaa 500 kilometriä kohden. Alle 1000 kilometrin etäisyyksillä todellinen etäisyys kerrotaan muuttujalla 1,5 ja pyöristetään seuraavaan 500 kilometriin. Välillä 1000 - 1200 km käytetään kiinteää arvoa 1500 kilometrille ja yli 1200 kilometrin matkoilla etäisyys kerrotaan muuttujalla 1,25. Käytännössä pienin prosenttiosuus on tällöin 18,5 % alle 500 km yhteyksille. Tätä arvoa käytettiin TDM-mittalaitteessa raja-arvona M.2100 mittauksissa, sillä se noudattaa samaa laskukaavaa. [56]

M.2100 määrittelee neljä testin pituutta, 15 minuuttia, 2 tuntia ja 24 tuntia. Näistä käytettiin 15 minuuttia jaksoa pikaiseen toiminnan toteamiseen ja osassa testitapauksista 24 tunnin jaksoa pidempiaikaisten vaikutusten tarkasteluun. Suositukseen on sisällytetty taulukot, joiden perusteella voidaan suoraan lukea ES ja SES rajat eri nopeusluokilla ja polun pituuksilla, mutta se pätee vain kansainväliselle osalle referenssipolkua. Siten on tarpeen laskea tavoitteet käytännön testeissä käytetylle puolen tunnin mittausajalle paikallisessa verkossa samoin kuin edellä. ESR-suorituskykytavoite koko polulle tiedetään olevan taulukon 5 perusteella 0,02, joten skaalattuna aiemmin lasketulle 18,5 % osuudelle saadaan arvo 0,0037. Kääntämällä suhde ajaksi tulee puolen tunnin mittajakson rajaksi enintään 6 virheellistä sekuntia. SESR raja tällä mittausjaksolle tiedetään suoraan olevan nolla johtuen tiukemmista suorituskykytavoitteista kuin G.821 tapauksessa. SESR raja-arvo 0.000185 sallisi yhden virhetilanteen per puolitoista tuntia.

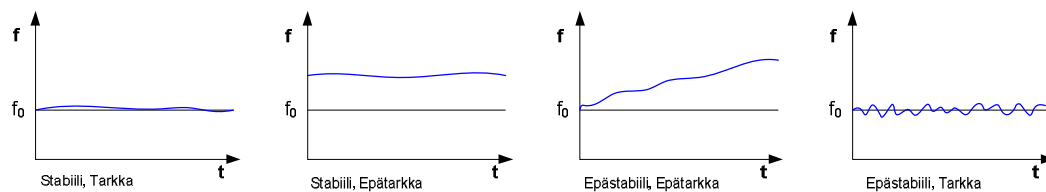
7.6 Mittaustuloksen luotettavuuden laatusuureet

Mittaustuloksen luotettavuutta voidaan mitata suureilla toistettavuus, tarkkuus, sekä stabiilisuus. Toistettavuus (Precision) kuvaa mittauskertojen välisten tulosten variaatiota muuttumattomissa olosuhteissa. Maalitauluanalogiassa toistettavan mittaustuloksen osumat ovat pienellä alueella lähellä toisiaan. Tarkkuus (Accuracy) kuvaa mittausten johdonmukaista osumista todelliseen arvoon [62]. Maalitauluanalogiassa tarkan tuloksen osumat ovat lähellä keskipistettä, joka kuvaa referenssiaikaa. Systemaattisen virheen sisältävä tulos on esimerkki huonosta tarkkuudesta. [10]



Kuva 31 Toistettavuus ja tarkkuus mittauksissa maalitauluanalogialla esitettynä

Kuvan 31 ensimmäinen mittaus vasemmalta tuottaa tarkan ja toistettavan tuloksen, mikä näkyy osumina pienelle alueelle keskipisteen ympärille. Toisen mittauksen tulokset ovat pienellä alueella, joten toistettavuus on hyvä. Tarkkuus on kuitenkin heikko, sillä etäisyys keskipisteestä on suuri. Kolmas mittaus tuottaa tuloksia keskipisteen ympäristöön, joten tarkkuus on hyvä. Toistettavuus on kuitenkin heikko, sillä tuloksissa on paljon vaihtelua. Neljännen mittauksen toistettavuus ja tarkkuus ovat heikkoja, sillä tulokset eivät osu lähelle tavoitearvoa tai toisiaan.



Kuva 32 Tarkkuus ja stabiilisuus taajuustasossa

Stabiilisuus kuvaa signaalin kykyä säilyttää arvonsa vakiona ajan kuluessa ja ympäristön muuttuessa (lämpötila, värinä, ikääntyminen, jne) [62]. Stabiili signaali ei värähtele eikä vaella taajuustasossa. Stabiilisuus voidaan edelleen jakaa lyhyen ja pitkän aikavälin stabiilisuuteen. Telealalla näiden välisenä rajana voidaan pitää yli 100 s aikajaksoa [5]. Kuvassa 32 ensimmäinen mittaus vasemmalta tuottaa lähelle nimellistaajuutta f_0 osuvan signaalin, jossa vaihtelevuutta on vähän. Siten tarkkuus ja stabiilisuus ovat hyviä. Toinen mittaus tuottaa melko stabiilin signaalin, mutta tarkkuus suhteessa tavoitearvoon on heikko. Kolmas mittaus tuottaa signaalin, joka värähtelee ja loittonee nimellistaajuudesta ajan kuluessa, edustaen wanderiksi kutsuttua ilmiötä. Sen tarkkuus ja stabiilisuus ovat heikkoja. Oikeanpuoleinen signaali on tarkka, mutta epästabiili heilahdellen tiheästi nimellistaajuuden f_0 ympärillä edustaen jitteriksi kutsuttua ilmiötä.

7.7 Kellosignaalin stabiiliuden mittasuureet

Kellosignaalin stabiiliutta halutaan mitata televerkoissa lähinnä kolmesta syystä, joita ovat kellojen suorituskyvyn todentaminen standardin suhteen, järjestelmän suorituskyvyn syvällisempi arviointi kellon toiminnan ja kohinan tuoton suhteen, sekä käytössä olevien kellojen suorituskyvyn seuranta kenttäolosuhteissa. [5]

Kellosignaalin stabiiliutta voidaan arvioida aika- ja taajuusalueessa. Taajuusalueessa mitataan hetkellisen taajuuden poikkeamaa nimellistaajuudesta, jonka tulisi olla PRC-johdannainen. Taajuusvaihtelun mittayksikkönä käytetään oskillaattoreissa usein taajuuspoikkeaman ja nimellistaajuuden suhdetta, josta käytetään yksikköä ppm (parts per million). [5]

Taajuusvirhe ppm-yksiköissä voidaan laskea kaavan 2 mukaisesti jakamalla mitatun taajuuden ja nimellistaajuuden erotus nimellistaajuudella ja kertomalla tulos miljoonalla. Miljardilla kertomalla saataisiin yksikkö ppb (parts per billion). E1-hierarkian nimellistaajuudella 2,048 MHz yksi ppm tarkoittaa siten $\pm 2,048$ hertsin taajuusvaihtelua.

$$ppm = \frac{\Delta f}{f_0} * 10^6 \quad (2)$$

Aika-alueessa stabiiliutta voidaan mitata ottamalla signaalin vaiheesta näytteitä tietyin väliajoin. Signaalin vaellusta eli wanderia mitataan tyypillisesti ITU:n määrittelemillä tilastollisilla suureilla aikavälivirhe (Time Interval Error, TIE), tarkasteluvälin suurin aikavälivirhe (Maximum Time Interval Error, MTIE) ja aikakeskihajonta (Time Deviation, TDEV) [13]. Aikakeskihajonta edustaa kellon kohinasta syntyvää aika-eron satunnaista komponenttia ja se määritellään aikavarianssin (Time Variance, TVAR) neliöjuurena. TVAR ja MTIE ovat ITU:n standardeissa useimmiten käytetyt laatuvaatimukset. Määritelmässä vertailukohtana, johon nähden virhettä lasketaan, on primäärikellosta saatu referenssisignaali ja mittaus suoritetaan kellon ulostulosta. [5]

Aikavirhe (Time Error, TE) voidaan määritellä tarkasteltavan kellon ajan $T(t)$ erona referenssikellon $T_{ref}(t)$ aikaan kaavan 3 mukaisesti. Siitä on muodostunut de facto standardi kellojen suorissa digitaalisissa mittauksissa sen helppouden vuoksi. Yksikkönä käytetään nanosekun teja. Saadusta näytejonosta voidaan laskea edelleen muita mittasuureita. [5]

$$TE(t) = T(t) - T_{ref}(t) \quad (3)$$

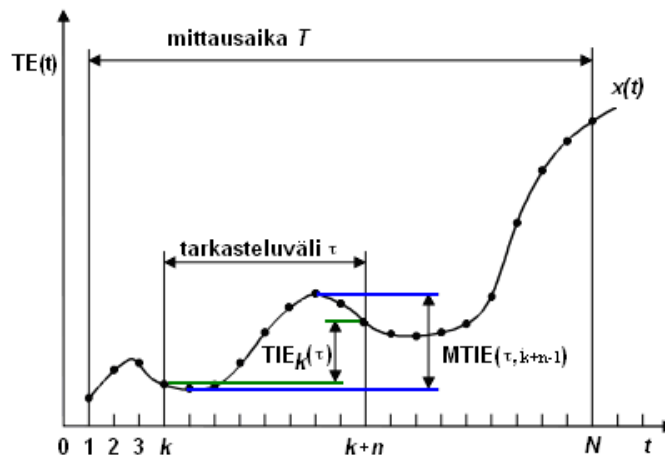
Aikavälivirhe TIE kertoo aikavirheen variaatiosta tarkastelujakson τ aikana alkaen hetkestä k . Se määritellään tarkastelujakson τ alku- ja loppupisteen välisten aikavirheiden erotuksena kaavan 4 mukaisesti [63]. Käytännössä kysymys on signaalin nousevan reunan vaihe-erosta suhteessa referenssisignaaliin.

$$TIE_k(\tau) = TE(k+\tau) - TE(k) \quad (4)$$

Tarkasteluvälin suurin aikavälivirhe MTIE määritellään kaavan 5 mukaisesti aikavirheen TE suurimpana huipusta-huippuun vaihteluna kaikissa tarkasteluvälin τ mittaisissa aikaikkunoissa, kun aikaikkuna liu'utetaan yli TE-kuvaajan koko mittausajan pituudella T [63]. PLL:n SEC-tasoiselle ulostulolle asetettu pitkän aikavälin MTIE toleranssi on $2 \mu s$ [14].

$$MTIE(\tau, T) = \max_{0 \leq t_0 \leq T-\tau} \left\{ \max_{t_0 \leq t \leq t_0+\tau} [TE(t)] - \min_{t_0 \leq t \leq t_0+\tau} [TE(t)] \right\} \quad (5)$$

Nämä kolme suuretta pystytään lukemaan suoraan aikavirhettä esittävästä kuvaajasta kuvassa 33 esitetyllä tavalla. MTIE-arvo tulee vielä kasvamaan kuvan esittämän hetken arvosta tarkasteluvälin liukuessa oikealle. Tarkasteluväli τ on määriteltä televerkkosovelluksissa yleensä välille 10^{-1} - 10^4 sekuntia [5].



Kuva 33 TE, TIE ja MTIE määritelmät [13]

Käytännössä näitä suureita mitataan yleensä tarkoitukseen sopivalla mittalaitteella, joka osaa antaa suoraan graafisen esityksen siitä, toteuttaako mitattu signaali standardin vaatimuksen. Tarkoitukseen sopivaa mittalaitetta ei kuitenkaan ollut käytettävissä.

Tässä työssä myöhemmin esiteltävät tulokset perustuvat taajuuserovertailuun reitittimen sisäisen oskillaattorin suhteen ja näytteinä on valmiiksi keskiarvoistettuja arvoja minuutin tarkasteluvälillä. Siten mittauksista ei voida laskea aitoja suureita, vaan niitä voidaan ainoastaan karkeasti estimoida.

Reitittimen tuottamasta ulostulon keskimääräisestä taajuuserosta voidaan johtaa tarvittaessa aikaero TE. Taajuusero voidaan esittää hertseinä käyttämällä kaavaa 2. Signaalin jaksonaika T on taajuuden käänteisluku. Jaksonaikaa ei pidä sekoittaa kuvan 33 mittausjakson pituuteen, vaikka niistä tässä käytetään samaa symbolia. Yhden signaalin jakson aikana syntyy kahden signaalin välille aikaeroa jaksonaikojen erotuksen itseisarvon verran. Sekunnissa virhettä syntyy nimellistaajuus f_0 kertaa jaksonaikojen erotus. Aikaeron kaava voidaan yksinkertaistaa muotoon, jossa esiintyy vain taajuuksien suhde kaavan 6 esittämällä tavalla.

$$TE(1s) = |T_0 - T| * f_0 = \left| \frac{1}{f_0} - \frac{1}{f} \right| * f_0 = 1 - \frac{f_0}{f} \quad (6)$$

Muokkaamalla taajuuseroarvoista aikaeroja edellisellä kaavalla, voidaan laskea suurpiirteinen MTIE-arvo mittauksissa käytetylle puolen tunnin mittausajalle. Lukuarvoja tarkastelemalla huomataan, että MTIE-arvo on itse asiassa suoraan reitittimen adaptiivisen kellonpalautuksen tilastojen ilmoittamien suurimman ja pienimmän taajuuseron keskiarvon erotus ja yksikkönä on nanosekunti eli sekunnin miljardisosa (ppb)! Tämä näkyy tulososion luvun 9.6.1 luiskahdusvälejä esittävästä taulukosta 11.

7.8 Luiskahdustiheyden määrittäminen

Lähetys- ja vastaanottopään kellojen käydessä eri taajuudella, tapahtuu lopulta bittivirhe, jota kutsutaan luiskahdukseksi. Yhden ppm:n taajuusero tarkoittaa, että yksi bitti miljoonasta puuttuu tai kahdentuu. E1-hierarkian bittinopeudella se tarkoittaa jo kahta virheellistä bittiä per sekunti.

Tunnettaessa mitatun signaalin taajuusero suhteessa nimellistaajuuteen f_0 , on mahdollista laskea luiskahdustiheys T_{slip} . Yhden bitin mittaisena aikana syntyy signaalien välille aikaeroa jaksonaikojen T erotuksen itseisarvon verran. TDM-piirillä oletetaan olevan yhden kehyksen kokoinen puskuri. Yhden E1-kehyksen ajallinen pituus on 125 μ s, joten kumulatiivisen aikaeron ylittäessä tämän arvon tapahtuu luiskahdus. Näillä tiedoilla voidaan laskea kaavan 7 mukaisesti bittimäärä N , jonka jälkeen kehyksen luiskahdus tapahtuu. [64]

$$N = \frac{T_{frame}}{|T_0 - T|} = \frac{T_{frame}}{\left| \frac{1}{f_0} - \frac{1}{f} \right|} \quad (7)$$

Kappaleessa 4.2 todettiin 2048 kbps nopeudella yhden bitin huipusta huippuun yksikkömitan UI_{pp} olevan 488 ns. Tällä tiedolla voidaan laskea luiskahdustiheys T_{slip} kertomalla bitin mitta UI_{pp} tarvittavalla bittien määrällä N kaavan 8 mukaisesti. Kaava antaa kahden luiskahduksen välisen teoreettisen aikavälin sekunteina huonoimmassa tapauksessa. [64]

$$T_{slip} = N * UI_{pp} \quad (8)$$

8 Testiympäristö

Tässä luvussa tutustutaan mittauksissa käytettyihin laitteisiin, ohjelmistoihin, testausympäristöön, ja testitapauksiin, joilla kokeiltiin käytännössä sarjaliikenne-yhteyksien kuljettamista pakettiverkon yli. Laitteiden yhteydessä käsitellään tutkitut reitittimet, apuna käytetyt PC:t ja tuloksien keruuseen käytetyt mittalaitteet. Ohjelmistot-luku käy läpi apuohjelmat, joilla saatiin aikaan emuloitu pakettiverkko, taustaliikennettä verkkoon, sekä kaapattua paketteja verkon keskeltä. Topologia-aliluku esittelee kaksi erilaista verkkorakennetta, jotka laitteista luotiin testejä varten. Lopuksi kerrotaan mittausprosessin muodossa mitä ja miten mitattiin.

8.1 Laitteet

Testauksen alaiset laitteet olivat Alcatel-Lucentin toimittamat mallin 7705 SAR-8 reitittimet, joita oli käytössä kaksi kappaletta. Reitittimet oli kalustettu E1-, RS232/V.35 sarjaliikenne- ja Ethernet-liitännäkorteilla. Verkkoon syötettiin 2,048 MHz kellosignaalia ja pseudosatunnaista testiliikennettä RS-232 tai E1 -muodossa JDSUn valmistamalla HST-3000-mittalaitteella. Reitittimien välille emuloitiin vaihtelevia ominaisuuksia tarjoava pakettiverkko yhdellä Linux PC:llä. Lisäksi molempiin reitittämiin oli kytketty Windows PC:t, joiden välillä voitiin lähettää taustaliikennettä pakettiverkkoon. Laitteiden yksityiskohtaisemmat ominaisuudet käydään läpi seuraavissa aliluvuissa.

8.1.1 Alcatel-Lucent 7705 SAR-8 reititin

SAR-8 reititin on pohjimmiltaan pelkkä 8-paikkainen kehikko, joka kalustetaan käyttötarkoitukseen sopivaksi. Se on kehitetty erityisesti erilaisten palvelujen kokoamiseksi yhteen yhdessä laitteessa. Tuettuja liitännärajoja erillisillä liitännäkorteilla ovat Ethernet, E1/T1, RS-232/V.35, sekä STM-1. Kuvassa 34 on esimerkkikalustus kahdella kytkinmoduulilla, kahdella Ethernet-kortilla ja neljällä E1-kortilla.



Kuva 34 Alcatel-Lucent 7705 SAR-8 modulaarinen reititin

Ethernet-kortilla on 6 kappaletta 10/100 Mbps sähköistä Ethernet-liityntää ja kaksi SFP-liityntää (Small Form-factor Pluggable) kuituyhteyksille. SFP-moduuleita käyttämällä voidaan käyttää myös gigabitin Ethernetiä kupari- tai kuitukaapeloinnilla. Moduulin valinta määrittää liitintyyppin ja saavutettavan maksimietäisyyden.

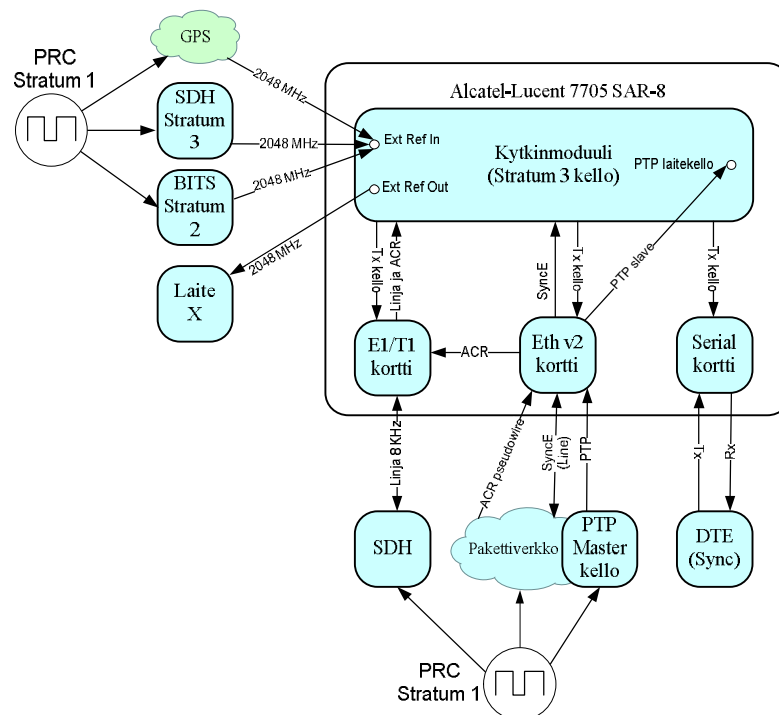
Yhdellä E1-kortilla on 16 liitännää. E1-kortti mahdollistaa myös ATM-yhteydet ja IP-liikenteen siirron kahden pisteen välillä PPP-protokollaa käyttäen. Tätä voi tarvita esimerkiksi toisen reitittimen yhteenliittämiseen kuparikaapeliyhteyden yli.

Sarjaliikennekortille voidaan kytkeä 12 kappaletta RS-232 tai V.35 -yhteyttä

riippuen valittavasta liitinpaneelistä. Valittavissa olevat nopeudet RS-232 tilassa ovat 1200, 2400, 9600, 19200, 38400 ja 56000 bps.

Pseudojohtoemulaatiotekniikoista SAR:ssa on tuettu CESoPSN ja SAToP E3-nopeusluokkaan asti. Alle 64 kilobitin yhteydet täydennetään 64 kiloiksi, mikä on CESoPSN-tekniikan pseudojohtojen miniminopeus. Käytännössä tämä tarkoittaa sarjaliikennekortilta tulevan liikenteen kapselointia CESoPSN-kehikseen yhdellä aikavälillä. Yhdestä portista sisään tuleva liikenne voidaan myös jakaa aikavälikohtaisesti useaan pseudojohtoon, siten että yhteyksien vastapää sijaitsevat eri laitteissa. Pseudojohto voidaan toteuttaa joko MPLS- tai GRE-tunneloinnilla pakettiverkon tyypistä riippuen. Metro Ethernet ei ole tuettu ainakaan nykyisellä ohjelmistoversiolla.

SAR voidaan synkronoida käyttäen ulkoista referenssikelloa, TDM-linjalta tulevaa kelloa, adaptiivista kellon palautusta, IEEE 1588 PTP:aa, sekä synkronista Ethernetiä. PTP-viestejä tuottavaa laitetta ei ollut käytettävissä. Testit keskittyivät linjakellon ja adaptiivisen kellon käyttöön kupariyhteyden yli. Lisäksi laitteet kytkettiin testimielessä yhteen gigabitin valokuituyhteydellä, jonka yli voitiin kokeilla myös synkronista Ethernetiä. Laitteen sisäinen kello on tasoa Stratum-3, jota voidaan käyttää synkronoinnin ylläpitoon ulkoisen signaalin puuttuessa. Tarkkuus vastaa SDH-laitteen kelloa ja STM-kortilla kalustettuna laite pitäisi pystyä kytkemään osaksi SDH-laiteketjua. Eri synkronointimahdollisuudet on esitetty kuvassa 35. Nuolet kuvaavat signaalien suuntia, joista osa on kaksisuuntaisia.



Kuva 35 Yhteenveto SAR:n synkronointiliitännöistä

Ulkoista synkronointiporttia voidaan käyttää tuomaan laitteelle korkeamman Stratum-tason 2,048 MHz taajuinen G.703-tyyppinen signaali koaksiaalikaapelia pitkin. Vastaavasta ulostulosta voidaan viedä vastaava signaali toiselle laitteelle.

E1-kortilta voidaan vastaanottaa linjakello E1-signaalin kehystyksestä. Käytettäessä adaptiivista kellon palautusta kello tieto kulkee Ethernet-kortilta E1-kortille. Varsinainen ACR-algoritmi sijaitsee E1-kortilla, jonka sisältämä kello tuottaa kytkinmoduulille

menevän synkronointisignaalin. Yksittäinen E1-portti voi ottaa lähetykseen käyttämänsä kellon muista porteista riippumatta linjalta, kytkinmoduulilta tai ACR:lta.

Ethernet-kortti vastaanottaa kaiken pakettiverkon yli kulkevan synkronointi-tiedon. PTP-pääkellolaitteelta vastaanotetut PTP-viestit ohjautuvat kytkinmoduulille, jossa sijaitsee varsinainen PTP-laitekello. Adaptiivinen kello kiertää edellä mainitulla tavalla E1-kortin kautta. Synkronisen Ethernetin tuki vaatii kuitulähetinmoduulin. Sen kautta vastaanotettu signaali välittyy suoraan kytkinmoduulille ja vastaa linjakelloa. Lähetykseen käytetty kello tulee aina kytkinmoduulilta.

Sarjaliikennekorttia ei voi käyttää koko reitittimen synkronointiin. Se voi ainoastaan ottaa oman lähetyksellönsä kytkinmoduulilta tai käyttää parina olevalta sarjaliikennelaitteelta vastaanotettua kelloa. Yksittäisen portin "sukupuoli" on ohjelmallisesti valittavissa. Kuvassa 35 se on määritelty DCE:ksi.

8.1.2 JDSU HST-3000 TDM-mittalaite

JDSU:n valmistamaa HST-3000 mittalaitetta käytettiin syöttämään testiverkkoon RS-232 sarjaliikennettä ja TDM-liikennettä. TDM-liikenteen mukana reitittimelle voidaan tarjota synkronointisignaali. Mittalaitteen sisäisen kellon tarkkuus ei selviä manuaalista, mutta se täyttää TDM-järjestelmien vaatimukset. Sen voidaan olettaa olevan Stratum-3 tai parempi, sillä reititin hyväksyy sen ensisijaiseksi kellolähteeksi. Muussa tapauksessa reititin vaihtaisi automaattisesti sisäiselle kellolle.

Mittalaite vertaa lähettämäänsä signaalia bittitasolla vastaanotettuun signaaliin ja laskee tämän perusteella erinäisiä virhearvoja yhteydelle. Se tuottaa testiliikenteenä ITU:n suositukseen O.150 mukaisia pseudosatunnaisia bittikuvioita, joita käsiteltiin aiemmin luvussa 7.3.

Laite on rakenteeltaan modulaarinen, joten sillä voidaan mitata hyvin erilaisia verkkotyyppisiä, kuten sarjaliikenne, DSL tai Ethernet, vain sovitussyksikköä ja mittakaapeleita vaihtamalla. Näissä mittauksissa käytössä oli vain sarjaliikennemoduuli.

Laite osaa antaa TDM-hälytysten ja bittivirheiden lisäksi suoraan tuloksen G.821-, G.826- ja M.2100- suositusten läpäisystä. Näiden mittausten yhteydessä täytyy vaatimustaso mitoittaa sopivaksi luvun 7.5 mukaisesti antamalla prosenttiosuus referenssipolun pituudesta sovitettuna testiverkkoon. Testijakso on mahdollista ajastaa halutun mittaiseksi ja virheiden tapahtumahetkiä voi seurata aikaan sidotusta tapahtumalokista.

8.1.3 Linux PC

Pyrittäessä emuloimaan reitittimien välille vaihtelevia olosuhteita tarjoavaa pakettiverkkoa, oli käytössä 800 MHz AMD Duron-suorittimella varustettu PC-pöytäkone 384 megatavun keskusmuistilla. Käyttöjärjestelmänä oli Debian-Linux. Tuki verkkojen siltaukselle ja virtuaalilähiverkoille toteutettiin Linuxissa käyttämällä BridgeUtils-paketista löytyviä brctl ja vconfig ohjelmia. Lopullisessa kokoonpanossa oli käytössä yksi verkkokortti, joka hoiti liikenteen molempien reitittimien suuntaan. Kokoonpanon optimoinnista verkkoemulaatiokäyttöön kerrotaan lisää luvussa 9.1. Varsinainen verkkoemulaatio hoidettiin netem-moduulilla, jota käsitellään tarkemmin luvussa 8.2.1.

8.1.4 Windows PC:t

Molempiin reitittimiin oli kytketty yksi toimistokäyttöön tarkoitettu kannettava tietokone, joiden välillä pystyttiin lähettämään verkkoon taustaliikennettä seuraavassa

luvussa esiteltävän iPerf-ohjelman avulla. Koneissa oli sisäänrakennetut gigabitin sekuntinopeuteen kykenevät Intel PRO 1000/MT verkkokortit, mutta linkin nopeus rajattiin sataan megabittiin sekunnissa.

Testejä tehdessä kävi ilmi, etteivät verkkokortit kyenneet oletusasetuksilla tuottamaan niin suuria liikennemääriä, kuin linkin kuormittamiseen halutulla tavalla oli tarpeen. Maksiminopeudet olivat 40 megabitin paikkeilla ennen asetusten säätämistä. Asia saatiin korjattua kasvattamalla verkkokortin ajureista samoja puskureita kuin Linux-koneen tapauksessa. Windowsissa säädöt löytyivät helpommin suoraan verkkokortin asetuksista.

8.2 Ohjelmistot

Tässä luvussa käydään läpi testeissä hyödynnetyt ohjelmistot iPerf, Netem ja Wireshark. Näitä käytettiin taustaliikenteen tuottamiseen verkkoon, viiveen emulointiin laitteiden välille ja pseudojohtoliikenteen pakettirakenteen analysointiin. Kaikki kolme ovat avoimeen lähdekoodiin perustuvia ohjelmistoja.

8.2.1 Taustaliikenteen tuottaminen verkkoon

Pakettipohjaisen verkkoliikenteen tuottamiseen verkon kuormittamiseksi käytettiin iPerf [65] nimistä ohjelmistoa, josta löytyy versiot useille käyttöjärjestelmille. Ohjelmalle voidaan säätää haluttu kaistanleveys, jonka se pyrkii varaamaan linkiltä lähettäen TCP- tai UDP-liikennettä. Tuloksena saadaan raportti läpäisystä ja pakettihukasta halutuun väliajoin. Lähetyksen keston voi rajata tiettyyn ajalliseen pituuteen tai pakettimäärään.

Liikennetyyppi oli yksisuuntainen UDP. Pakettikokoa pienennettiin 1400 tavuun, sillä oletusarvo 1480 tavua sai aikaan satunnaisesti liian suuria paketteja, mikä katkaisi taustaliikenteen kesken mittauksen. Taustaliikenteen kokemaan laatuun ei kiinnitetty huomiota esimerkiksi hävinneiden pakettien suhteen.

Testitapauksia tarjoavia dokumentteja kuten G.8261 selatessa kävi selville, että iPerfista puuttuu ominaisuus lähettää erikokoisia paketteja tietyn liikenneprofiilin mukaisesti. Myös ajan kuluessa muuttuvan kuormitustason mahdollisuus olisi hyödyllinen. Nämä ominaisuudet monipuolistaisivat ohjelman käyttömahdollisuuksia huomattavasti, mutta oletettavasti sellaisiin vaaditaan jo kaupallisia mittalaitteita.

Yli 80 megabitin sekuntinopeudet kuluttivat tietokoneesta niin paljon resursseja, että samalla koneella sarjaportin kautta käytetty konsoliyhteys hidastui selvästi ja tulostus oli pätkittäistä. Osa tekstistä jopa hävisi kokonaan.

8.2.2 Viiveen emulointi verkkoon

Netem on Linux ytimeen 2.6 sisältyvä verkkoemulaatiomoduli, joka on integroitu Linuxin Traffic Control -alijärjestelmään. Se kykenee esimerkiksi emuloimaan verkkoon kiinteää viivettä, viiveen vaihtelua, pakettihukkaa, pakettien korruptoitumista, pakettien järjestyksen vaihtumista, sekä pakettien monistumista verkkoliitännäkohtaisesti. Häiriöt voidaan korreloida halutulla todennäköisyydellä ja viiveenvaihtelut voidaan sitoa tiettyyn todennäköisyysjakaumaan, jolloin saavutettava vaikutus on realistisempi. Netem kykenee yhden millisekunnin erottelukykyyyn käytettäessä Linuxin ytimessä 1000 Hz ajastinta. [66].

Netem toimii periaatteella, jossa verkkoliitännältä kaapataan liikennettä, tallennetaan paketteja eri jonoihin ja odotetaan säännöissä säädettyä hetkeä, jolloin ne päästetään takaisin verkkoon. Se vaikuttaa ainoastaan verkkoliitännän ulostulossa.

Paketit järjestyvät lähetysjonossa saamansa viiveen mukaisesti laskennallisen lähtöhetken mukaiseen järjestykseen. Sen johdosta viiveenvaihtelun tuottaminen saa aikaan pakettien järjestyksen vaihtumista, mikäli kahden peräkkäisen paketin välinen aikaero on pienempi kuin tuotettu viive [66]. Siten lähetyspuskuri ei ole aito FIFO.

Tämän kaltaiset emulaattorit on yleensä suunniteltu lähiverkon yli käytettävien ohjelmien testaamiseen, minkä johdosta niitä ei välttämättä ole ajateltu käytettävän näin suurien pakettimäärien kanssa. Liikenteen muokkaukseen käytetään Token Bucket-algoritmia, joka luovuttaa lähetysvuoroja. [67]

Käytetyt viiveet valittiin siten, että 25 millisekuntia edustaisi suurinta normaalikäytössä oletettavissa olevaa viivettä. Toiseksi tapaukseksi valittiin kaksinkertainen 50 ms äärimmäisen tapauksen mallina. Teorian perusteella viiveellä itsessään ei pitäisi olla oleellista vaikutusta toimintaan, vaan viiveen vaihtelu on mielenkiintoisempi parametri. Vaihtelun määrän suhde kiinteään viiveeseen haluttiin pitää samana, olettaen sen kasvavan jossain määrin lineaarisesti viiveen kasvaessa. Viiveen vaihtelu valittiin niin, että se olisi mahdollisimman lähellä puskurin maksimikoon puolikasta. Tällöin perustilanteessa puolillaan oleva puskuri käy lähellä maksimia ja minimiä viiveen vaihdella. Puskurin koon arvona käytettiin oletusarvoa 5 ms ja kaksinkertaista arvoa 10 ms. Nämä arvot löytyvät liikenne-tyyppikohtaisesti luvun 9 taulukosta 8.

Reitittimien puskurien kannalta absoluuttisilla viivearvoilla ei ole merkitystä, koska ne näkevät vain vaihteluvälin, jonka pitää pysyä puskurin efektiivisissä rajoissa. Lisäksi Windows-koneilla pingin tulokset pyörivät lähimpään millisekuntiin, minkä johdosta tulos voi pyörityksestä johtuen näyttää olevan vaihteluvälin ulkopuolella. Yksinkertaisuuden vuoksi käytettiin korreloimattomia viiveitä, jolloin vaihtelu olisi toivottavasti keskimäärin yhtä suurta keskiarvon molemmin puolin. Emuloitujen viiveiden toteutumista käsitellään luvussa 9.2.

8.2.3 Pakettiliikenteen rakenteen analysointi

Wireshark on yleisesti käytetty ohjelmisto pakettiliikenteen kaappaamiseksi verkkokortilta pakettien kehysrakenteen tutkimista varten. Liikennettä kaappaamalla pyrittiin toteamaan rakenteen vastaavuus standardidokumentteihin. Wiresharkista löytyy tuki CESoPSN- ja SAToP-kehysien tunnistamiselle alkaen versiosta 1.2.0. [68]

Käytössä kävi ilmi, että Wireshark kykenee tunnistamaan pseudojohtopaketit oikein vain kontrollisanaan asti. Sitä seuraavia tavuja ohjelma luuli virheellisesti Ethernet-kehukseksi, minkä johdosta sen näyttämä hyötykuorman koko oli aina liian pieni. Tämä virhe on korjattu käsin liitteissä oleviin pakettien rakennetietoihin.

8.3 Testiverkon topologia

Tässä luvussa kerrotaan, miten laitteet kytkettiin yhteen testikokoonpanoksi ja miten verkkoliikennettä siirrettiin niiden välillä. Testattavat laitteet olivat Alcatel-Lucentin 7705 SAR-tyypin reitittimiä, joita oli verkossa kaksi kappaletta. Näistä käytetään nimitystä "A-pää" ja "B-pää". A-päähän syötettiin ulkoista kellosignaalia ja testiliikennettä. B-päästä luettiin tilastoja adaptiivisen kellon laadusta.

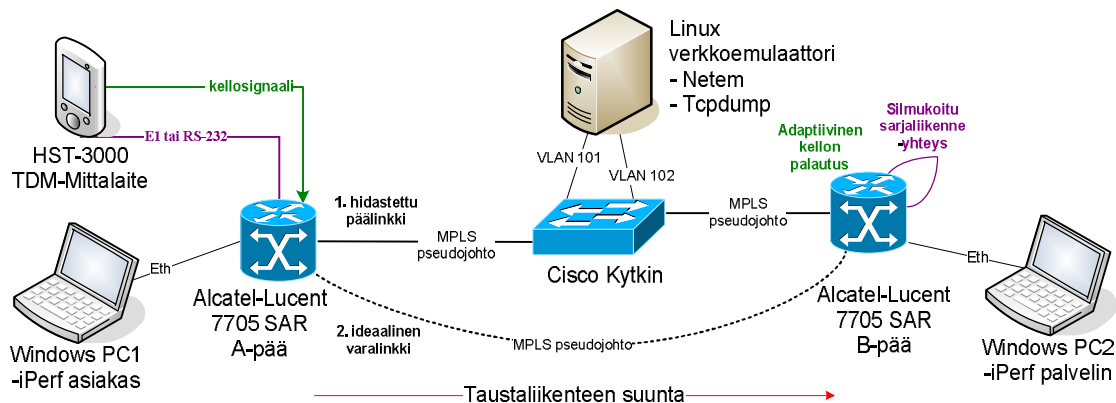
Reititimet oli yhdistetty toisiinsa kytkimen välityksellä, joka kierrätti liikenteen netem-verkkoemulaattoria pyörittävän Linux-koneen läpi virtuaalisia lähiverkkoja (Virtual Local Area Network, VLAN) hyödyntäen. Lisäksi reitittimien välille kytkettiin suora varareitti, josta saatiin vertailutulokset ideaalisesta verkosta. Tästä reitistä käytetään myöhemmin tulosluvussa nimitystä "suora" erotuksena keinotekoisesti

viivästettyihin reitteihin. Pseudojohtojen liikenteelle annettiin reitittimissä suurin prioriteetti, jonka perusteella ne käsiteltiin lähetysjonosta aina ennen taustaliikennettä.

Mittauksissa hyödynnettiin JDSU HST-3000 mittalaitetta sarjaliikenteen mittausmoduulilla varustettuna tuottamaan 2,048 MHz kellosignaali A-pään reitittimelle, sekä syöttämään verkkoon pseudosatunnaista TDM- tai sarjaliikennettä eri muodoissa. Mittalaite käytti lähetyskellonaan omaa sisäistä kelloaan. Primäärikelloon johdettavissa olevan synkronointisignaalin puute on oleellinen ongelma tässä testikokoonpanossa, minkä johdosta tulosten vertailu standardeja vastaan ei ole mahdollista.

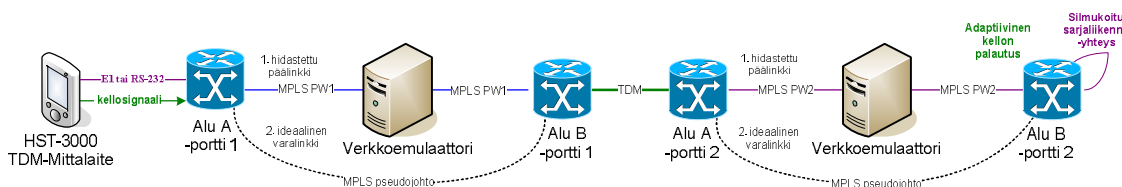
A-pään reititin oli säädetty ottamaan kellonsa ensimmäisen TDM-portin linjalta, jossa mittalaite oli kiinni. B-pään reititin palautti kellon adaptiivisesti pakettiverkon yli kulkeneesta liikenteestä pohjautuen A-pään kelloon. Testiliikenne käännettiin B-päästä takaisin A-päähän fyysisellä silmukalla E1- tai RS-232-portissa. Näin mittalaite pystyi vertaamaan bittitasolla vastaanottamaansa signaalia lähetettyyn virheiden toteamiseksi.

Linux-koneelta oli mahdollista kaapata paketteja tcpdump-ohjelmalla niiden rakenteen tutkimista varten. Molempiin reitittimiin kytkettiin yksi Windows PC, joiden välillä voitiin lähettää taustaliikennettä verkkoon käyttäen iPerf-ohjelmistoa. A-päässä sijaitsi UDP-tyyppistä liikennettä lähettävä asiakasohjelmisto ja B-päässä sitä vastaanottava palvelin. Näiden välillä voitiin myös tarkastella verkon yli toteutunutta viivettä. Taustaliikenne oli yksisuuntaista, siten että suunta oli sama kuin adaptiivisen kellosignaalin suunta. Kaksisuuntainen liikenne olisi tukkinut välillä olevan koneen verkkokortin. Perustopologia "A-B" on esitetty kuvassa 36. Laitteisto vastaa oleellisilta osiltaan MEF 18-dokumentissa määriteltyä testijärjestely numero kahta [34].



Kuva 36 Testiverkon perustopologia "A-B"

Perustopologian lisäksi luotiin vielä laajennettu "A-B-C-D"-topologia, jossa testiliikenne kulkee molempien reitittimien kautta kahdesti ennen kääntymistä takaisin. Rakenteensa puolesta sen voi mieltää myös "A-B-A-B"-topologiaksi, mutta tässä työssä käytetään ensimmäistä nimitystä. Tavoitteena oli saada aikaan suurempi luonnollinen viive ja enemmän kuormitusta testattaville laitteille. Käytännössä reitittimien välille luotiin kaksi eri pseudojohtoa porttien 1 ja 2 välille. Liikenteen matkattua porttien yksi välillä A:sta B:hen, käännettiin se takaisin A:han todellista TDM-yhteyttä käyttäen, minkä jälkeen liikenne matkasi toista pseudojohtoa pitkin uudelleen A:sta B:hen porttien kaksi välillä. Yhteyttä ei voitu luoda yhtenä pseudojohtona, koska sen alku- ja loppupiste ovat sidottuja reitittimien loopback-osoitteisiin, jotka ovat tässä tapauksessa samat kahdella eri pseudojohdolla. Laajennettu topologia on esitetty kuvassa 37. Kuvasta on jätetty pois tilan säästämiseksi Windows PC:t ja kytkin.



Kuva 37 Testiverkon laajennettu topologia "A-B-C-D"

B-pään kello otettiin jälkimmäisen pseudojohdon sisääntulosta ja liikenne käännettiin silmukalla takaisin. Näin ollen testiliikenne käsitellään reitittimissä yhteensä kahdeksan kertaa perustopologian neljän sijasta. Tällä tavoiteltiin hieman suurempaa kuormitusta laitteille.

ACR-algoritmi on sidottu tiettyyn TDM-porttiin, mutta käytännössä tuloksen kannalta on merkitystä Ethernet-portin läpi kulkevalla liikennemäärällä, sillä siinä kohdassa liikenne on vielä pakettimuotoista. Tässä topologiassa liikenne kulkee kahdesti saman fyysisen linkin yli päätyen aina samaan Ethernet porttiin, joten toinen lenkki tuplaa pakettimäärän aikayksikköä kohden. Sillä voi olla pieni parantava vaikutus algoritmin toimintaan, sillä dokumentaatio suosittelee pakettimääräksi 1000–4000 per sekunti. Perustopologiassa paketteja on vain minimimäärä 1000, mutta laajennetussa topologiassa niitä on 2000.

Yhdellä kierroksella testiliikenne kulkee verkkoemulaattorin läpi neljästi, minkä johdosta sen suorituskyky ei enää riittänyt taustaliikenteen käsittelemiseen tässä topologiassa. Viivästettyä linkkiä voitiin käyttää näin ollen vain viiveen tuottamiseen ilman taustaliikennettä. Suora yhteys laitteiden välillä oli edelleen olemassa ja sen kautta pystyttiin lähettämään myös taustaliikennettä. "A-B-C-D"-topologiaa käytettiin ainoastaan E1-liikennetyyppien kanssa kaapelointiteknisistä syistä.

8.4 Mittausprosessi ja testitapaukset

Liikennetyypeinä väylätyyppisestä sarjaliikenteestä testeissä olivat synkroninen ja asynkroninen RS-232 bittinopeudella 9600 bps, kahdeksalla databitillä, ilman pariteettia ja yhdellä stop-bitillä, lyhyesti ilmaistuna 8N1. Aikajakoisesti kanavoitu liikenne oli tyypiltään kehystetty E1 31 kanavalla (G.704) tai kehystämätön E1 (G.703). Näihin viitataan tulevaisuudessa termeillä G.703 ja G.704. Näin voitiin tutkia sekä CESoPSN-että SAToP-kehystystä. RS-232 yhteydet käyttivät aina CESoPSN-kehystystä.

Ensimmäiseksi varmistettiin eri liitöntöjen ja kaapelointien toimivuus lähettämällä testiliikennettä reitittimeltä A reitittimelle B ja silmukoimalla se takaisin lähtöpisteeseen. Kehystettyjä ja kehystämättömiä E1-liikennetyyppejä kokeiltiin yksitellen, toisen ollessa poissa käytöstä. Liikennetyypit oli asetettu eri fyysisiin portteihin, joita kytkettiin käyttöön ja pois käytöstä tarpeen mukaan. Siirtotien oikea toiminta varmistettiin lähettämällä kunkin testiliikenteen joukossa tarkoituksellinen bittivirhe, jonka piti tulla takaisin lähtöpäähän "korjautumatta". Näin voitiin varmistua liitöntöjen oikeasta fyysisestä ja ohjelmallisesta toiminnasta.

Mittausten välissä syötettiin testiliikennettä vähintään 15 minuutin jakso antaen verkon stabiloitua uusiin asetuksiin. Vaihe- ja taajuusvirheiden arvojen kehitystä seurattiin kunnes ne suurpiirteisesti asettuivat jollekin stabiilille tasolle. Samalla katsottiin, ettei TDM-mittalaitteeseen tule bittivirheitä tai hälytyksiä. Mittausten aikana kävi ilmi, että erityisesti G.703-tyyppinen liikenne voi vaatia jopa 30 minuutin stabilointijakson tasalaatuisten tulosten saamiseksi.

Varsinainen mittausjakso rajattiin puoleen tuntiin, minkä aikana E1-liikennetyyppien osalta otettiin talteen vaihelukitun silmukan antamat virhearvot vaiheesta ja taajuudesta adaptiiviselle kellolle B-pään reitittimeltä. Pidemmät mittausajat olisivat tuottaneet luotettavampia tuloksia, mutta tiedon keruu olisi ollut huomattavan työlästä ja aikaa vievää johtuen reitittimien tuottamien kellotilastojen esitystavasta. Tilastot joutui keräämään käsin aina edeltävältä 15 minuutin jaksolta, eivätkä sitä vanhemmat tulokset tallentuneet mihinkään. Mittaustulosten keruu siis vaati lähes jatkuvaa läsnäoloa.

Mittausten jälkeen käytiin läpi eri emulointipalveluiden virhelaskurit ja katsottiin oliko B-reitittimen adaptiivinen kello pysynyt normaalitilassa. TDM-mittalaitteesta tarkistettiin tulos bittivirheistä ja häilytyksistä ja tarvittaessa tallennettiin aikajana virheiden esiintymisestä. Ensin tehtiin mittaukset tyhjiin verkkoon ja sen perään suoritettiin toinen puolen tunnin mittausjakso taustaliikenteellä muutoin samoilla asetuksilla. Tämä prosessi toistettiin kaikille liikennetyypeille eri viivearvoilla ja verkkotopologioilla mahdollisuuksien mukaan. Yhteenvedo suoritetuista testeistä löytyy Tulokset-luvun taulukosta 8. Asetusten vaihdon yhteydessä nollattiin portteihin ja emulointipalveluihin liittyvät laskurit.

8.5 Liikennetyyppien ominaisuudet

Tässä luvussa käydään läpi eri sarjaliikennetyyppien siirtoon käytettävät toteutukset pakettiverkon näkökulmasta. Taulukossa 7 on listattu neljän eri sarjaliikennetyypin käyttämät kehystystyypit, aikavälien lukumäärä, pakettikoko MPLS-verkossa, yhden paketin hyötykuorman koko tavuina, kehystyksen hyötysuhde, liitännän tuottama pakettimäärä per sekunti sekä viiveenvaihtelun torjumiseen käytetyn puskurin koko millisekunteinä ja pakettimääränä. Kaksi viimeistä riviä kertovat kuinka monta pakettia puskurissa pitää olla, ennen kuin se alkaa syöttää paketteja linjalle ja miten paljon viiveenvaihtelua voi esiintyä tämän "keskipisteen" ympärillä ilman, että puskuriin tulee yli- tai alivuotoa. Kaikki taulukon arvot ovat reitittimestä kerättyjä oletusarvoja kyseisille liikennetyypeille. Viivepuskurin koko voidaan asettaa välillä 3-250 millisekuntia. Toistoraja ja pakettiviiveenvaihtelun sietokyky ovat suoraan riippuvaisia viivepuskurin koosta.

Taulukon 7 arvoista seuraavalla sivulla voidaan suoraan laskea tietyn kehystyksen vaatima tiedonsiirtokapasiteetti kertomalla pakettimäärä hyötykuorman koolla. Näin esimerkiksi G.704 tyyppin kehystyksellä tietoa liikkuu keskimäärin 2480 kilobittia sekunnissa yhtä täyttä 2048 kbps E1-liitäntää kohden. Tämä on lukema, jonka laitteen TDM-portti näyttää siirtomääräksi. Siitä puuttuvat vielä kontrollisana, kaksi MPLS-leimaa ja yksi Ethernet kehys, joiden jälkeen nähdään todellinen MPLS-verkossa kulkevan paketin koko.

CESoPSN-kehystyksen hyötysuhteeksi saadaan kaikki edellä mainitut huomioiden 90,5 prosenttia per paketti. SAToP:ssa hyötysuhde on samaa tasoa. RS-232 liikenteessä se on selvästi heikoin johtuen pienestä hyötykuorman koosta.

Taulukko 7 Liikennetyyppien käyttämät kehystyypit ja viivepuskurien oletusarvot

Liikennetyyppi:	E1 NxDS0	E1 CAS	E1 Kehystämätön	RS-232 sarjaliikenne
ITU-T nimitys:	G.704	G.704 CAS	G.703	V.24 / V.28
Kehystystyyppi:	CESoPSN	CESoPSN CAS	SAToP	CESoPSN
Aikavälejä:	31	30	32	1
Pakettikoko	274 B	521 B	282 B	90 B
Hyötykuorma:	248 B	480 B	256 B	64 B
Hyötysuhde	90,5 %	92,1 %	90,8 %	71,1 %
Pakettimäärä:	1000 pps	500 pps	1000 pps	125 pps
Viivepuskuri:	5 ms (5 pkt)	8 ms (4 pkt)	5 ms (5 pkt)	32 ms (4 pkt)
Puskurin toistoraja:	3 pakettia	3 pakettia	3 pakettia	3 pakettia
Viiveenvaihtelun sietokyky:	±2,0 ms	±4 ms	±2,0 ms	±16 ms

9 Tulokset

Mittausten tavoitteena oli saada selville, minkälaisia häiriöitä pseudojohtoemulaatio-tekniologia sallii verkolta ja miten se reagoi muutoksiin verkossa. Mittaustuloksen hyväksyttävyyden mittana käytettiin kahta asiaa; adaptiivisen kellon pysymistä hyväksyttävällä tasolla ja bittivirheiden pysymistä aiemmin käsiteltyjen normien sisällä. Mittaustulokset taajuustarkkuudesta ja bittivirheistä perustuvat kahteen toisistaan erilliseen mittauskertaan, joista parempi tulos valittiin. Taustalla oli aiempia kokeiluja, joiden perusteella oli mahdollista arvioida tulosten laatua. Ensimmäisessä aliluvussa käsitellään lisäksi verkkokortin säätäminen emulointikäyttöön sopivaksi.

Edellisten asioiden lisäksi tutkittiin verkkoon emuloidun viiveen vastaavuutta pyydettyyn arvoon, TDM-liikenteen kokemaa viivettä verkon päästä-päähän ja emulointipalveluiden tuottamien pakettien sisältöä otsaketasolla. Tässä luvussa käydään läpi saadut tulokset. Luvun lopussa esitellään yksi mahdollinen ratkaisumalli sarjaliikennelaitteiden verkottamiseen pakettipohjaisella teknologialla.

Taulukossa 8 on esitetty yhteenveto eri testitapauksista. OK-merkintä kertoo hyväksyttävästä tuloksesta, NOK-merkintä puolestaan hylätystä. Kuormitus kertoo suurimman saavutetun taustaliikenteen määrän kyseisellä verkkotopologialla, kuitenkin niin että yli 85/45 Mbps kuormitusta ei kokeiltu verkkotyypistä riippuen. Tavoitearvoksi otettiin G.8261 mukaisesti 80 % linkin kapasiteetista eli 80 Mbps. Se on ilmeisen yleisesti käytetty arvo suositeltavasta linkin maksimikuormituksesta normaalikäytössä. Tähän tavoitteeseen päästiin kaikissa neljässä suoran viivästämättömän yhteyden tapauksessa.

Taustakuorma 85 Mbps tarkoitti yhden E1-yhteyden TDM-liikenne mukaan lukien noin 90 % kuormitusta linkille, mitä voi pitää jo varsin äärimmäisenä. Tällä kuormalla pystyi käyttämään myös kahta rinnakkaista E1-yhteyttä, joista toisella ei ollut aktiivista liikennettä. Se varaa silti verkosta aina vakiokaistan lähettäen täytebittejä.

Taulukko 8 Suoritetut testit liikennetyypeittäin eri verkkotopologioilla ja viivearvoilla

Mittausjakso 30 minuuttia	A-B suora	A-B-C-D suora	A-B 25±2ms	A-B 50±4ms	A-B-C-D 25±2ms	A-B-C-D 50±4ms
G.704	OK	OK	OK	OK	OK	OK
kuormitus	85 Mbps	85 Mbps	45 Mbps	45 Mbps	NOK	NOK
G.703	OK	OK	OK	OK	OK	OK
kuormitus	85 Mbps	85 Mbps	40 Mbps	30 Mbps	NOK	NOK
RS-232 sync	OK	-	OK	OK	-	-
RS-232 async	OK	-	OK	OK	-	-

Laajennetun "A-B-C-D" topologian kuormitusmittauksia lukuun ottamatta kaikki taulukon mittaukset saatiin suoritettua hyväksyttävin tuloksin. G.703-liikenteen viivästetyt tapaukset olivat ainoat hyväksytyt testit, jotka eivät selvinneet täydestä taustaliikenteestä. Niille haettiin kuormituksen ylärajaa 5 Mbps portaissa lähtien pienentämään kuormaa teoreettisesta maksimista tai kasvattamaan pienemmistä arvoista. 30 Mbps tulos on hyväksyttävyyden rajoilla. Näissä tuloksissa oli merkittävää vaihtelua mittauskerroittain. Kahden taulukosta näkyvän viivearvon lisäksi tutkittiin yksittäismittauksina suurinta sallittua viivettä arvoilla 100, 200 ja 300 millisekuntia, jotka kaikki toimivat virheettösti. Kiinteä viive järkevissä mittasuhteissa ei näytä aiheuttavan yhteydelle ongelmia. Aliluvussa 9.6 esitetään mittauksista valikoivasti mielenkiintoiseksi koettuja tuloksia kellon stabiiliudesta.

9.1 Verkkokortin asetusten säätö

Linux PC:n verkkokortin asetusten hienosäätäminen osoittautui suurimmaksi yksittäiseksi tekijäksi vastaanottopään vaihelukitun silmukan tuottamien virhearvojen optimoinnissa ja sitä kautta mittaustulosten laadun parantamisessa. Käänteisesti voi todeta, että viivemittaukset testaavat kenties enemmän siltaavan PC:n, kuin itse reitittimien suorituskykyä.

Linux-koneessa oli aluksi kaksi erilaista toimistokäyttöön tarkoitettua 10/100 Mbps verkkokorttia hoitamassa siltausta kahden kytkimen portin välillä. Näillä korteilla aikaansaadut vaihe-erotulokset olivat kuitenkin niin heikkoja, että kokoonpanoa täytyi pyrkiä parantamaan. Adaptiivinen kello ei pysynyt normaalitilassa kuin muutaman minuutin jaksoja.

Emuloinnin onnistumisen kannalta ydinkysymys on käyttöjärjestelmän jakamien keskeytysten jakotiheys tietokoneen eri laitteiden välillä. Keskeytyksellä oheislaitte ilmaisee prosessorille tapahtumasta, johon prosessorin pitäisi reagoida. Esimerkiksi verkkokortti, äänikortti ja näytönohjain kilpailevat samoista resursseista. Suurehko pakettimäärät vaativat huomattavasti tiheämmin keskeytyksiä kuin normaalissa toimistokäytössä on tarpeen. Verkkokorttien käyttämistä yleisajureista ei löytynyt tähän ominaisuuteen säätömahdollisuuksia.

Tästä johtuen päädyttiin hankkimaan kokeeksi yksi Intel PRO 1000/GT Desktop -mallin verkkokortti. Se käyttää omia e1000-sarjan ajureita, joissa on huomattavasti paremmat säätömahdollisuudet kuin edellisten korttien yleisajurissa. Kappalehinta on myös yli kolminkertainen.

Intel-korttia kokeiltiin aluksi toisen peruskortin rinnalla, siten että molemmat hoitivat liikennettä omaan reitittimeensä päin kytkimen kautta. Parhaat tulokset saavutettiin hoidettaessa siirtosuuntien siltaus samalla Intelin kortilla yhden verkkoliitännän kautta, jolloin peruskortin rajoitteet eivät heikentäneet tulosta.

Kytöntä käytettiin ns. trunk-tilassa, jossa molempien siirtosuuntien virtuaaliverkot kulkevat samasta liitännästä kytkimeltä verkkokortille. Näin yhden siirtosuunnan teoreettiseksi maksimikapasiteetiksi muodostui kuitenkin vain 50 Mbps. Tällä on ainoastaan merkitystä kuormitettaessa verkkoa taustaliikenteellä.

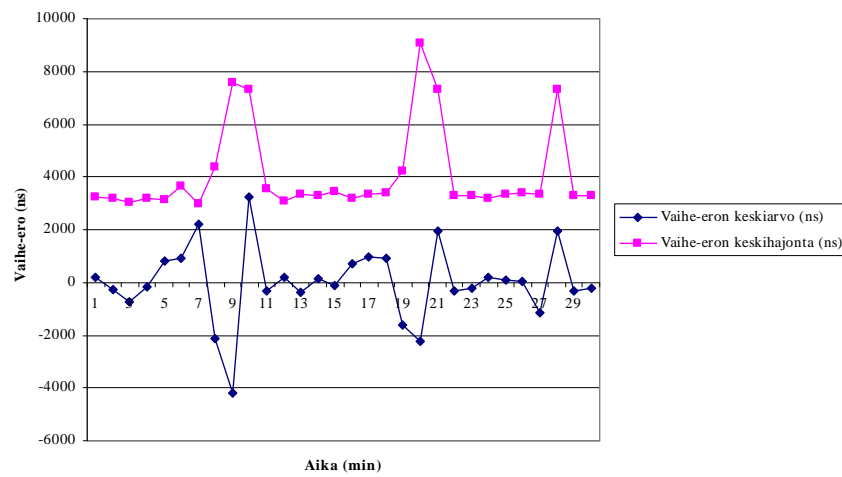
Resurssien jako yhdellä kortilla aiheuttaa selvän heikkouden mittauskokoonpanoon, mutta vallitsevissa olosuhteissa se oli vain hyväksyttävä. Kahden identtisen Intel-kortin käyttöä ei tutkittu. Lähtökohtaisesti yhden kortin pitäisi saada käyttöönsä keskeytyksiä tiheämmin, kun sillä on vähemmän kilpailijoita muista laitteista. Kortin sisäinen logiikka ratkaisee, miten se saamansa resurssit käyttää.

Keskeytysten yhdistäminen on ominaisuus, jolla voidaan säädellä kuinka usein verkkokortti lähettää paketteja käyttöjärjestelmän ytimen käsiteltäväksi. Verkkokortti on usein oletussäädöillä asetettu adaptiiviseen tilaan, mikä tarjoaa suurempaa läpäisyä viiveen kustannuksella. Pienien pakettien tapauksessa kannattaa lähettää useampia paketteja yhdellä keskeytyksellä ytimen käsiteltäväksi, jolloin säästyy prosessorisyklejä. Intel suosittelee Linux käyttöön arvoa 8000 per sekunti kun halutaan pientä viivettä [69], jolloin keskeytyksiä syntyy verkkokortin käyttöön vähintään yksi 125 mikrosekunnissa. Se on samalla maksimilatasenssi. Siitä on hyötyä tilanteessa, jossa kaksi pakettia saa verkkoemulaattorilta lähellä toisiaan olevan lähetysajan. Linuxissa ominaisuutta voi säätää "ethtool -C" komennolla tai verkkokorttimoduulin asetuksista "modprobe" komennolla.

Toinen tärkeä asetus viiveen säätelyn kannalta on lähetykseen ja vastaanottoon käytettävien rengaspuskurien kapasiteetti. Rengaspuskuri on tietorakenne, joka vaikuttaa olevan päästään yhdistetty renkaaksi, siten ettei sillä ole selvää alku- tai loppupistettä. Tietorakenteen elementtejä ei tarvitse siirtää muistissa sitä mukaa kun

yksi elementti on käytetty, vaan kohta voidaan pyyhkiä ja lukea jonon kärjestä seuraava arvo ulos samalla kun uudet sisään tulevat arvot tallennetaan jonon perään. Täten jonon alkua ja loppua osoittavat osoittimet liikkuvat rengasta pitkin kuormituksen mukaan. Ominaisuus tekee rengaspuskurista erityisen sopivan FIFO-tyyppisen (First In First Out) jonon toteutukseen. [70]

Oletuksena Intelin verkkokortilla lähetyksen ja vastaanoton rengaspuskurit pystyvät säilömään 256 keskeytystä maksimin ollessa 4096. Nämä oletusasetukset osoittautuivat riittämättömiksi viiveen emuloinnin kannalta. Puskurin koolla huomattiin olevan suora vaikutus vaihelukitun silmukan antamiin vaihe-eroihin. Kuvassa 38 rengaspuskureita ei ole vielä säädetty, minkä johdosta vaihe-eron keskihajonta on pienimmilläänkin kymmenkertainen myöhemmin esitettäviin tuloksiin nähden. Lisäksi esiintyy valtavia hyppyjä.



Kuva 38 Vaihe-erot vastaanottopäässä ennen verkkokortin rengaspuskurien säätöä

Kokeilujen kautta parhaiksi arvoiksi osoittautuivat 1024 vastaanottopuskurille ja 512 lähetyspuskurille. Jokainen paikka puskurissa kuluttaa 2 kilotavua fyysistä muistia, joten näillä arvoilla vastaanottopuskuri vie kaksi megatavua ja lähetyspuskuri yhden megatavun muistia [71]. Kortilla on sisäistä muistia 64 kB, josta paketteja siirretään edelleen tietokoneen keskusmuistiin.

9.2 Emuloidun viiveen toteutuminen testiverkossa

Tulosten uskottavuuden kannalta oli oleellista tarkistaa, millaista viivettä työssä käytetty verkkoemulaattori todellisuudessa tuotti läpimenevälle liikenteelle. Eri laitteiden ping-toteutuksia verrattaessa kävi ilmi Linux PC:n olleen ainoa, joka antoi arvot 0,1 millisekunnin tarkkuudella, muiden jäädessä yhteen millisekuntiin.

Paketteja käsitellään verkkoemulaattorissa yksittäisinä jokaisen saadessa eri viiveen, pikemmin kuin yhtenä vuona, mikä olisi lähempänä todellisen verkon toimintaa. Testien liikennemäärillä saapuvien pakettien väliseksi aikaeroksi muodostuu yksi millisekunti, minkä johdosta uudelleenjärjestymistä tapahtui valtavasti pakettien saadessa 0,1 ms tarkkuudella olevia viivearvoja. Asian olisi voinut säätää toisinkin, mutta vähäisen dokumentaation vuoksi käytettyä lähetysjonoa ei haluttu lähteä vaihtamaan. Perusasetuksilla kokeiltuna verkkokortin säädöt olisi pitänyt hakea uudelleen, mikä ei ajallisesti ollut mahdollista.

Jatkuvasti vaihtuva viive tuottaa paketteja organisoivalle vastaanottopään IWF:lle maksimaalisen haasteen. Tämä oli liikaa synkronointiin käytetylle B-pään reitittimen portille yhdistettynä väärässä järjestyksessä saapuviin paketteihin. Siksi muuttuva viive

emuloitiin vain A-pään vastaanottavaa porttia kohden. IWF selviytyi pakettien järjestämisestä hyvin, sillä TDM-liikenteen eheys ei kärsinyt.

Erona porttien välillä on se, että A-päätä käytettiin pelkästään liikennöintiin, mutta ei synkronointiin. Tämä osoittaa osaltaan sen, miksi laatustandardeissa annetaan eri vaatimukset näille kahdelle käyttötarkoitukselle. Järjestely tekee viiveiden numeroarvoista lähinnä viitteellisiä, mikä on huomioitava tuloksia tarkastellessa. Kuitenkin aliluvun 9.5 tuloksista tullaan näkemään, että viivearvoilla on näkyvä vaikutus myös B-päässä, vaikka A-B välillä on näennäisesti viiveetön reitti. Tämä johtuu mittauskokoonpanon verkkokortin resurssien jaosta siirtosuuntien välillä, jolloin B-A välin hidastus vaikuttaa epäsuorasti myös vastakkaiseen suuntaan.

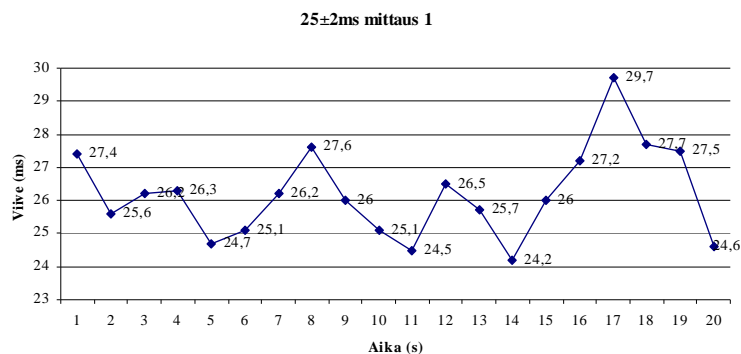
Taulukon 9 arvot on mitattu Linux-koneelta Windows PC1 suuntaan, joten ne arvioivat vain emuloidun viiveen toteumaa hidastetulla linkillä. Hidastusta tapahtuu linkillä vain toiseen suuntaan, mutta suoran yhteyden aiheuttaman viiveen ollessa alle 0,1 millisekuntia, sillä ei ole juuri merkitystä tuloksissa. Molemmista tapauksista on esitetty kaksi tulosta, jotka perustuvat 20 sekunnin mittausjaksoon oletuspakettikoolla 64 tavua ja kerran sekunnissa tuleviin vastauksiin.

Taulukko 9 Emuloidun viiveen toteutuneet arvot testiverkossa

Säädetty viive	Minimi	Keskiarvo	Maksimi
25±2 ms, mittaus 1	24.237 ms	26.234 ms	29.722 ms
25±2 ms, mittaus 2	23.890 ms	25.760 ms	27.691 ms
50±4 ms, mittaus 1	47.199 ms	52.164 ms	54.894 ms
50±4 ms, mittaus 2	47.035 ms	50.488 ms	54.548 ms

Tuloksista nähdään, että viiveen minimiarvo on aina vaihteluvälin sisällä, mutta maksimi ylittää kahdessa tapauksessa arvon keskiarvo plus vaihteluväli. Mitatut keskiarvot ovat aina suurempia kuin tavoitearvo. Käyttöjärjestelmän ajastimesta johtuva yhden millisekunnin tarkkuus vaikuttanee osittain tähän. Pseudojohtoliikenteellä on pingiä korkeampi prioriteetti reitittimen verkkoportin lähetyksessä, mikä voi näkyä mittautulosta suurentavana tekijänä.

Kuvassa 39 on esitetty tarkempi kuvaaja ensimmäisen mittauksen tuloksista. Kuvasta nähdään, että vain arvo 29,7 ms on todellisen keskiarvon 26,2 ms ympärillä olevan 2 ms kuvitteellisen vaihteluvälin ulkopuolella. Kuvan perusteella samansuuntainen trendi viiveen kehityksessä jatkuu 2-3 sekuntia kunnes suunta kääntyy. Ilman vaihtelua tuottavaa viivekomponenttia viiveet olivat melko tasaisia ja tavoitearvon tasolla.



Kuva 39 Testiverkossa mitatut viiveet 25±2 ms viiveasetuksella 20 s aikajaksolla

Verkkoemulaattoreita vertaileessa artikkelissa [67] lähinnä vastaavilla asetuksilla tuotettu toteutunut viive 10 ms tavoitearvolla poikkesi myös ylöspäin tuottaen sahalaitaista kuviota 10,5 - 11,0 ms välillä yhden millisekunnin jaksoilla. Sen perusteella Netem toimi odotetusti. Yhteenvetona viiveen vaihtelun voi sanoa pysyvän suurpiirteisesti halutulla vaihteluvälillä.

9.3 Kiertoaikaviive TDM-liikenteellä

Taulukossa 10 on esitetty TDM-liikenteelle mitatut kiertoaikaviiveet eri liikennetyypeille, puskurin arvoille ja verkkotopologioille kolmella eri viiveellä. Näissä arvoissa on mukana IWF:n suorittama puskurointi, mikä ei näy Ethernet-porttien välisen liikenteen viiveessä, kuten edellisen luvun pingissä.

Taulukko 10 Kiertoaikaviiveet eri liikennetyypeille ja verkkotopologioille

Liikennetyyppi ja puskurikoko	Topologia ja viiveen suuruus					
	A-B suora	A-B-C-D suora	A-B 25±2ms	A-B 50±4ms	A-B-C-D 25±2ms	A-B-C-D 50±4ms
G.704 5ms	6,6ms	13,2ms	32,3ms	-	64,7ms	-
G.704 10ms	12,7ms	25,2ms	36,1ms	63,6ms	65,5ms	124,2ms
G.703 5ms	5,9ms	12,4ms	31,9ms	-	63,2ms	-
G.703 10ms	12,5ms	25,3ms	38,0ms	63,2ms	63,7ms	121,9ms
RS-232 sync	92,0ms	-	129,6ms	162,0ms	-	-
RS-232 async	95,6ms	-	134,6ms	167,1ms	-	-

Useimmissa tapauksissa G.703 tuottaa hieman lyhyemmän viiveen kuin G.704, johtuen yksinkertaisemmasta paketoitavasta. Arvoissa todettiin esiintyvän jopa parin millisekunnin vaihtelua mittauskertojan välillä, mikäli asetuksia oli välillä muutettu. TDM-mittalaite näyttää aina vain yhtä kiinteää viivearvoa, vaikka verkkoemulaatio muuttaa sitä jatkuvasti. Ohjekirja ei sitä sano, mutta kyseessä oletetaan olevan maksimiviiveen.

Ping-mittauksista tiedetään, että IP-liikenteen näkemä kiertoaikaviive suoralla A-B topologialla on alle 0,1 millisekuntia. Muu osa tuloksista syntyy TDM-liikenteen pilkkomisesta paketteihin, vastaanotto-puskuroinnista ja emulaation tuottamasta viiveestä. Kokonaisviiveillä on merkitystä ennen kaikkea yhteyttä käyttävien sovellusohjelmien kannalta. Tässä testissä ei ollut käytettävissä mitään tiettyä sovellusta, jonka toiminta olisi voitu todeta.

Sähkölaitosympäristössä tiedetään olevan käytössä TDM-pohjaisia releiden suojausyhteyksiä, joille on määritelty maksimi viiveeksi siirtojärjestelmän osalta 5 millisekuntia kaikissa olosuhteissa [72]. Tuloksista näkee, ettei ainakaan oletusasetuksilla ole mahdollista saavuttaa kyseistä vaatimusta. Säättämällä puskuri kolmen millisekunnin minimiarvoon saatettaisiin päästä lähelle, mutta asiaa ei kokeiltu. Puskuroinnin hyöty olisi jo hyvin kyseenalainen yhden paketin kokoisena ja verkon laadun täytyisi olla todella hyvä virheettömän toiminnan takaamiseksi.

9.4 Kehystystyyppien sisältö

Wireshark-ohjelmaa käytettiin Linux-koneen läpi menevän pakettiliikenteen eri kehystystyyppien sisällön tutkimiseen. Kuvassa 40 on esitetty eri liikennetyyppien tuottamien pakettien sisältö otsaketyypeittäin sisältäen otsakkeen koon tavuina. Palveluista G.703 käyttää SAToP-kehystystä ja muut kolme CESoPSN-kehystystä. Havaitut rakenteet vastaavat teoriaosassa esitettyjä tietoja. Myös RTP-otsake asettui kokeiltaessa oikealle kohdalleen. Sitä ei esitetä kuvassa, koska se ei ollut käytössä suorituskykyä mitatessa.

Molemmat kehystykset jakavat saman perusrakenteen, joka koostuu 14 tavun Ethernet-otsakkeesta, kahdesta neljän tavun MPLS-leimasta, sekä neljän tavun pseudojohdon kontrollisanasta. Päällimmäinen MPLS-leima on itse pseudojohdon otsake ja alempi vastaavasti tietyn emuloidun palvelun otsake. Alemmassa otsakkeessa on MPLS-leimapinon pohjaa merkkavaa bitti päällä. Hyötykuorman koko on ohjelmallisesti säädettävissä. Kuvassa 40 esitetyt koot ovat oletusarvoja. Liitteestä 3 löytyy lisäksi esitys G.703-tyypin paketista tavutasolla, jossa eri otsakkeet on korostettu värein. G.704 olisi muuten samanlainen, mutta hyötykuormaa on 4 tavua vähemmän.

Kanavakohtaista merkinantoa käyttävä CAS-kehystys sisältää lopussa neljä bittiä merkinantosanomille jokaista 30:ntä aikaväliä kohden. Mittalaite tallensi bitteihin vain nollaa. Esimerkki tämän tyyppin paketista on liitteessä 2. Hyötykuorman koko on merkittävästi suurempi kuin tavallisessa G.704 kehystyksessä, joten pakettimäärä on vain 500 per sekunti. Se on puolet tavanomaisen G.704:n määrästä.

RS-232 kehystyksessä hyötykuormalle on varattu 64 tavua, joka jakautuu kahdeksi 32 tavun kehykseksi. Toisesta kehyksestä on käytössä hyötykuormalle 6 tavua ja toisesta 8 tavua, jolloin todellista hyötykuormaa siirretään yhteensä 14 tavua pakettia kohden muun ollessa täytebittejä. Käytetyt bitit vaihtelevat pakettikohtaisesti. Tästä tyyppistä löytyy esimerkki liitteestä 4, jossa hyötykuorman kuuluvat tavut on korostettu.

G.703		G.704		G.704 CAS		RS-232 Async/Sync	
Ethernet	14 B	Ethernet	14 B	Ethernet	14 B	Ethernet	14 B
MPLS	4 B	MPLS	4 B	MPLS	4 B	MPLS	4 B
MPLS	4 B	MPLS	4 B	MPLS	4 B	MPLS	4 B
PW Kontrollisana	4 B	PW Kontrollisana	4 B	PW Kontrollisana	4 B	PW Kontrollisana	4 B
Hyötykuorma	256 B	Hyötykuorma	248 B	Hyötykuorma	480 B	Hyötykuorma	64 B
				CAS	15 B		

Kuva 40 Kehystystyyppien rakenteet

9.5 Synkroninen RS-232 sarjaliikenne

Yksi testin päätarkoituksista oli tutkia synkronisen RS-232 sarjaliikenteen toimintaa pakettiverkossa. Asynkronisen liikenteen tiedetään toimivan hyvin yksinkertaisilla muuntolaitteilla, joita kutsutaan sarjalaitepalvelimiksi. Ne eivät yleensä vain sisällä tukea synkronoinnille. Tekniikka on kehitetty 1960-luvulla, joten kirjallista tietoa sen ominaisuuksista oli lähes mahdotonta löytää. Yleensä asia kuitataan toteamalla kyseessä olevan vain erikoisratkaisuihin käytetty liikennetyyppi. Esimerkiksi synkronoinnilla vaadittua tarkkuus ei koskaan selvinnyt. Perusajatuksena on ollut vain kahden laitteen välinen synkronointi, ilman verkon laajuista yhteistä kelloa. Kovin vaativa se ei voi olla ottaen huomioon määrittelyajankohdan yleisen tekniikan tason. Parhaiten asia selvisi kokeilemalla.

Aluksi RS-232 liikennettä käytettiin yhdessä E1-liikenteen kanssa niin, että reitittimet ottivat synkronointinsa E1-liikenteestä. Sarjaliikenneyhteys on huomattavasti enemmän puskuroitu hitaasti bittinopeudesta johtuen kuin E1, mikä selviää aiemmasta taulukosta 7. Siten viiveenvaihtelulla ei pysty häiritsemään tämän tyyppin toimintaa ilman että E1-yhteys hajoaisi ensin.

RS-232 yhteys kärsi bittivirheistä, mikäli sille ei annettu tavallista pakettiliikennettä parempaa prioriteettia tapauksessa, jossa samalla linkillä esiintyi myös taustaliikennettä. Priorisoimattomana suurin mahdollinen taustaliikenne jäi noin 75 megabitin tasolle, mikä on siis noin kymmenen megabittia vähemmän kuin korkeamman prioriteetin kanssa.

Lopulta päädyttiin kokeilemaan synkronista sarjaliikenneyhteyttä yksin ilman rinnalla olevaan E1-yhteyttä. Tässäkin tapauksessa reitittimen sisäinen kello riitti ylläpitotilassa synkronoinnin suorittamiseen, vaikka yhteyttä ulkoiseen synkronointilähteeseen ei ollut. Tulos on odotettu, sillä 1960-luvulla yksinkertaisissa elektroniikkalaitteissa ei varmasti ole ollut stratum-3 tason sisäisiä kelloja. Koko verkon laajuinen tarkka synkronointi tuli tarpeelliseksi vasta SDH:n myötä.

9.6 Adaptiivisen kellon taajuustarkkuus

Taajuustarkkuus mittaa adaptiivisen kellonpalautusalgoritmin onnistumista siirron yhteydessä syntyneiden häiriöiden neutraloimisessa kellosignaalista yhteyden vastaanottavassa laitteessa. Tässä luvussa käydään läpi tuloksia eri testitapauksista ja pyritään löytämään eroja eri kehystystyyppien välille. Luku on jaettu lukemisen helpottamiseksi useampaan alalukuun. Tapauksia tutkitaan sekä taajuuden, että tarvittaessa vaiheen suhteen. Kuvaajissa keskiarvot on esitetty vasemman reunan asteikolla ja keskihajonnat oikean reunan asteikolla, mikäli tarvitaan erilaista skaalaa. Termi "suora" viittaa tilanteeseen, jossa reitittimet on kytketty kaapelilla yhteen ilman verkkoa häiritsevää emulaatiokomponenttia käyttäen topologiakuvan 36 ideaalista varareittiä.

Referenssinä on nimellinen 2,048 MHz taajuus, johon nähden lasketaan poikkeamaa. Paras mahdollinen tulos olisi nolla. Synkronointisignaalia syöttävän HST3000-mittalaitteen taajuuden tiedetään vaihtelevan laitteen näytöstä luettuna noin puolesta yhteen hertsin verran 2,048 MHz keskitaajuuden ympärillä lähetykspäässä, mikä teoriaosassa esitetyllä kaavalla 2 muutettuna vastaa noin 500 ppb arvoa. Tämä on siten vähimmäisvirhe vastapäässä. Sen vuoksi tulokset eivät ole vertailukelpoisia

mahdollisista muista lähteistä löytyvien primäärireferenssikellojohdannaisen signaalin tuottamiin mittauksiin nähden.

Kuvaajissa esiintyvät arvot ovat minuutin välein laskettuja keskiarvoja. Minuuttia kohden laite ottaa 30 näytettä kahden sekunnin aikavälein. Vertailevien kuvaajien mittaukset on tehty eri aikoina. Vaihe-ero kertoo vaihelukitun silmukan sisään tulevan takaisinkytketyn ohjaussignaalin laadusta. Taajuusero puolestaan kuvaa oskillaattorin ulostulon arvoa, joka näkyy asiakaslaitteille. Lukujen pienuudesta johtuen ppb-yksikkö kuvaa tulosta paremmin kuin hertsit. PLL pyrkii välissä korjaamaan poikkeamaa nimellistaajuudesta, kuten luvussa 4.4 esitettiin. Mittauksia tehdessä havaittiin positiivisen vaihe-eron kasvattavan taajuuseron numeroarvoa ja negatiivisen vastaavasti pienentävän sitä.

9.6.1 Tyypillinen luiskahdustiheys

Tässä aliluvussa pyritään luomaan yleiskuva myöhemmissä aliluvuissa esitettävien taajuuserotuloksien merkityksestä yhteyden toiminnalle. Lähetys- ja vastaanottopään kellojen käydessä eri taajuudella, tapahtuu lopulta luiskahduksia, kuten luvussa 4.2 todettiin.

Taulukkoon 11 on laskettu huonoimman tapauksen luiskahdusvälien arvoja muutamalle tyypilliselle taajuuserolle luvun 7.8 kaavojen avulla. Taajuusero asettuu mittaustuloksissa välille 1200–1750 ppb, mikä vastaa taajuutena noin 2,5–3,6 hertsia. PDH:n taajuustarkkuuden vaatimus 50 ppm puolestaan vastaa noin 102 hertsia, joten sen alle päästään selvästi. Kolmas sarake kertoo, kuinka paljon mitattu signaali edistää suhteessa nimellistaajuiseen signaaliin per sekunti. Puuttuvasta referenssisignaalista johtuen tulokset näyttävät todellista tilannetta selvästi huonommilla, sillä niissä ei voida huomioda lähettävän päänn kellosignaalin taajuusvaihtelua. Tulokset on laskettu nimellisen 2,048 MHz signaalin suhteen. Vertaamalla laskettuja arvoja liitteen 1 luiskahdustiheyksiin, voidaan laadun todeta olevan näillä arvoilla hieman Stratum 3 tasoa heikompi. Suuruusluokka vaikuttaa oikealta.

Verrattaessa aikaerosaraketta taajuuseron keskiarvoon ppb-yksikössä, voidaan todeta näiden olevan lukuarvoltaan samoja, kuten luvussa 7.7 todettiin. Siten mittaustulokselle saadaan tarkasteluvälin suurin aikavälivirheen arvo MTIE suoraan mittausjakson suurimman ja pienimmän taajuuseron erotuksena. Tämä havainto konkretisoi reitittimen tuottamia tilastoja huomattavasti. MTIE jää kaikissa mittauksissa selvästi alle pitkän ajan raja-arvon 2 μ s.

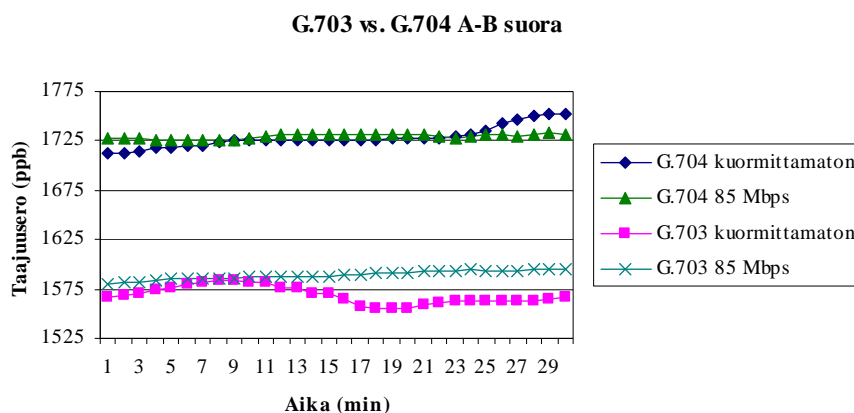
Taulukko 11 Laskennallisia luiskahdusvälejä eri taajuuseroille

Taajuuseron keskiarvo		Aikaero per sekunti	Luiskahdusväli
(ppb)	(Hz)	(μ s)	(s)
1200	2,458	1,20	104,11
1350	2,765	1,35	92,54
1500	3,072	1,50	83,29
1550	3,174	1,55	80,60
1650	3,379	1,65	75,71
1750	3,584	1,75	71,39

9.6.2 Verkon kuormituksen vaikutus optimaalisissa olosuhteissa

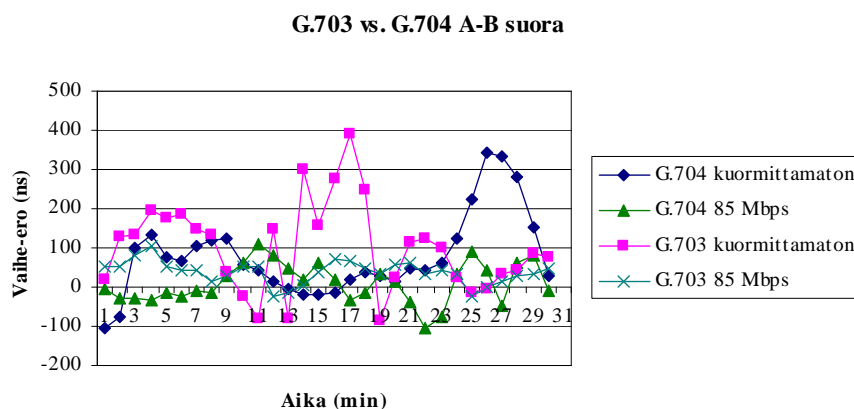
Kuvassa 41 on esitetty optimaalisessa "A-B"-topologian verkkoympäristössä taajuustarkkuuden arvot molemmilla kehystystavoilla ilman kuormaa ja 85 megabitin taustaliikenteen kanssa. Kuvasta voi todeta signaalien olevan melko stabiileja, mutta hieman epätarkkoja, sillä poikkeamaa referenssistä tulee säännöllisesti noin 1,575 ppm

tai 1,725 ppm kehystystavasta riippuen, vaihtelun ollessa 1-2 ppb. Kuormitus ei juuri muuta taajuuseroa, mutta se näyttää vähentävän kuormittamattomissa tapauksissa esiintyvää aaltoilua. Tätä voi pitää yllättävänä havaintona, koska muun liikenteen pitäisi aiheuttaa vaihtelua.



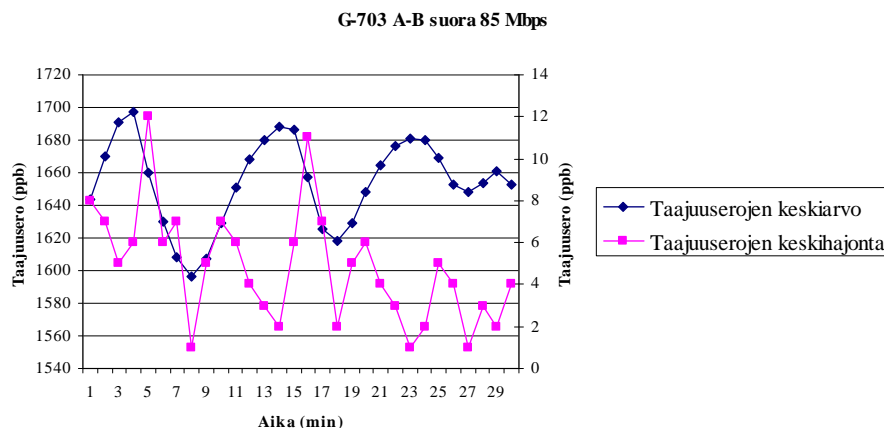
Kuva 41 Kuormituksen vaikutus taajuuseroon suoralla A-B linkillä

Kuva 42 paljastaa signaalien vaihe-eroista kuormittamattomien linkkien laadun suuremman vaihtelun. Laaja taajuusskaala häivyttää pienemmän aaltoilun taajuuserokuvasta.



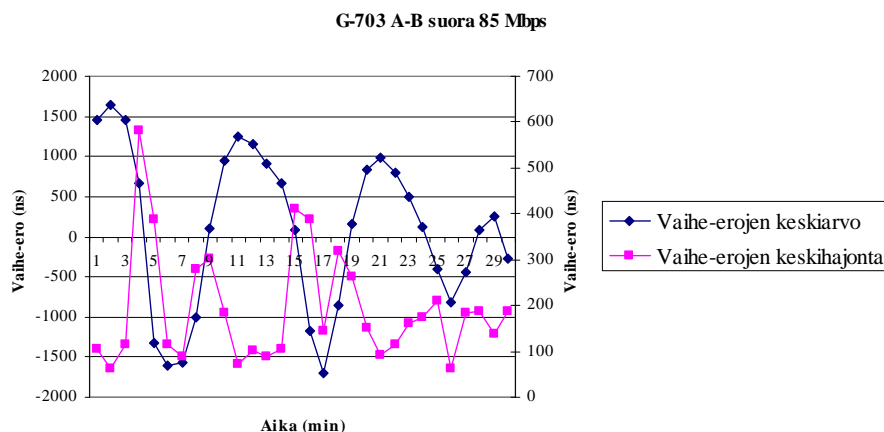
Kuva 42 Kuormituksen vaikutus vaihe-eron keskiarvoon suoralla A-B linkillä

Kuvassa 43 lähestytään taajuuden suhteen stabiilia tilaa, mutta taajuusero heilahtelee edelleen aaltomaisesti oletetun keskitaajuuden molemmiin puolin. Heilahtelu vähenee tasaisesti keskihajonnan pienentyessä. Kellonpalautusalgoritmi sopeutuu yhä paremmin taustalla kulkevaan liikenteeseen. Tässä on käytetty eri mittauskerran tulosta kuin kuvan 40 vertailussa samasta testitapauksesta.



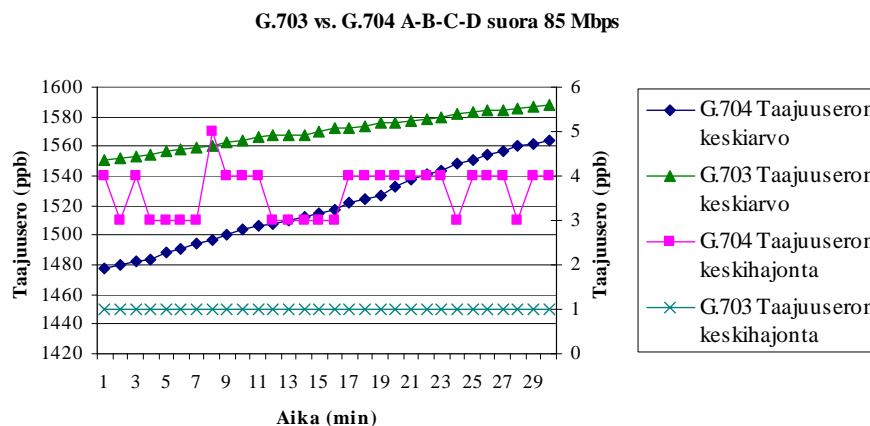
Kuva 43 G.703 A-B topologian taajuuseron kehitys kuormitettuna 85 Mbps taustaliikenteellä

Vertaamalla kuvaa 43 samalta ajalta piirrettyyn vaihe-eroja esittävään kuvaan 44 nähdään taajuuden ja vaiheen suhde toisiinsa lähelle samanmuotoisina sinisinä käyriä. Vaihe-eron numeerisista arvoista nähdään, että sopeutumisvaihe on vielä käynnissä, mikä tukee havaintoa G.703-liikenteen selvästi pidemmästä stabiloitumisajasta G.704 verrattuna.



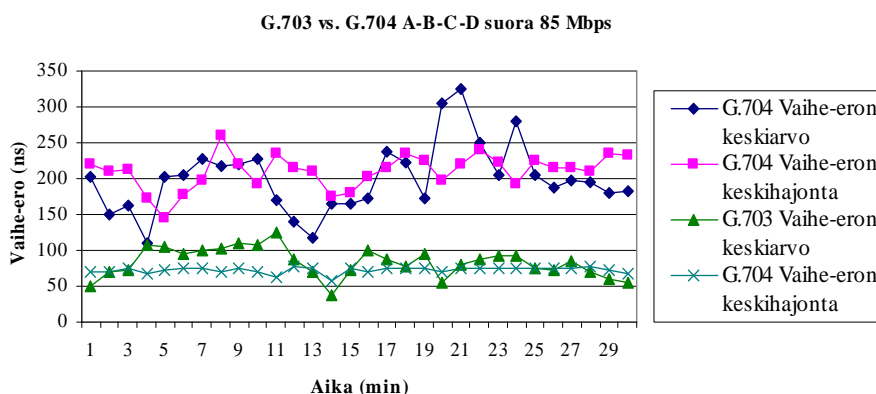
Kuva 44 G.703 A-B topologian vaihe-eron kehitys kuormitettuna 85 Mbps taustaliikenteellä

Kuvassa 45 on esitetty taajuuserojen vertailu G.703 ja G.704 liikennetyypeistä laajennetussa A-B-C-D topologiassa 85 Mbps taustaliikenteellä. Tilastojen tallennushetkellä hetkellä G.703-testi on ollut käynnissä jo 18 tuntia alkaen negatiivisesta taajuuserosta. G.704 kohdalla tilasto on otettu tavallisesta 30 minuutin testistä. Testejä ei ole suoritettu peräjälkeen. Taajuuserokäyrien käyttäytyminen on yllättävän samankaltaista. Vaihelukittu silmukka korjaa G.703 taajuutta jatkuvasti ylöspäin tasaisella yhden ppb:n minuuttivauhdilla (oikean reunan asteikko). G.704 osalta korjaus on huomattavasti nopeampaa ja vaihtelevaa johtuen lyhyemmästä mittausajasta. Molemmat selvästi vielä hakevat vakaata tilaansa.



Kuva 45 G.703- ja G.704-tyyppien taajuuserojen vertailu 85 Mbps kuormituksella A-B-C-D topologiassa

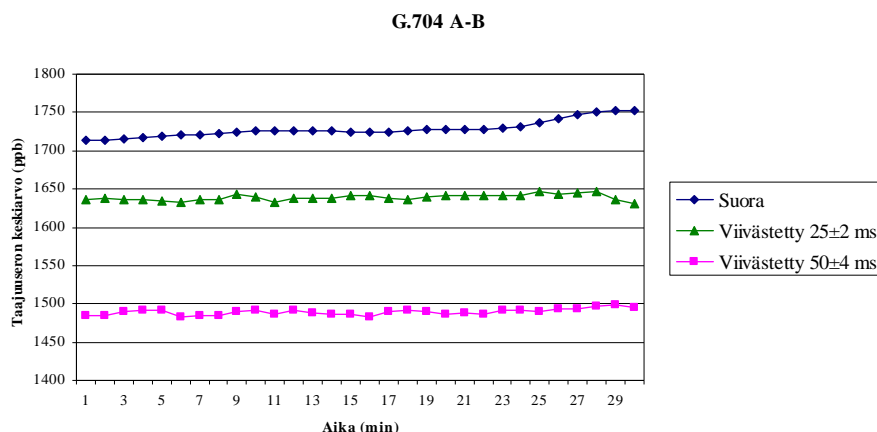
Saman testin vaihe-ero kuvaaja kuvassa 46 osoittaa G.703:n olevan vakaammassa tilassa sen arvojen ollessa noin kolmasosa G.704 arvoista ja heittelevän selvästi vähemmän.



Kuva 46 G.703- ja G.704-tyyppien vaihe-erojen vertailu 85 Mbps kuormituksella A-B-C-D topologiassa

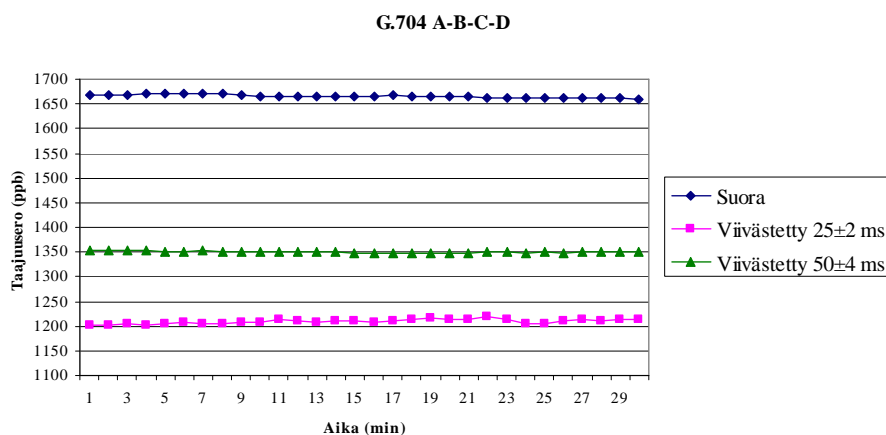
9.6.3 Viiveen vaikutus taajuuseroon liikennetyypeittäin

Kuvassa 47 nähdään G.704 tyyppin A-B topologian taajuuserojen keskiarvot suoralta ja kahdelta viivästetyltä linkiltä. Näiden arvojen perusteella näyttää siltä, että viive ja sen vaihtelu itse asiassa parantavat tulosta, mitä voi pitää yllättävänä tuloksena. Jokainen tuloksista on melko stabiili, joskin taajuuseron keskimääräinen arvo vaihtelee mittaushetkittäin samoillakin asetuksilla. Laaja taajuuseroskaala hävittää pienimmät muutokset kuvasta.



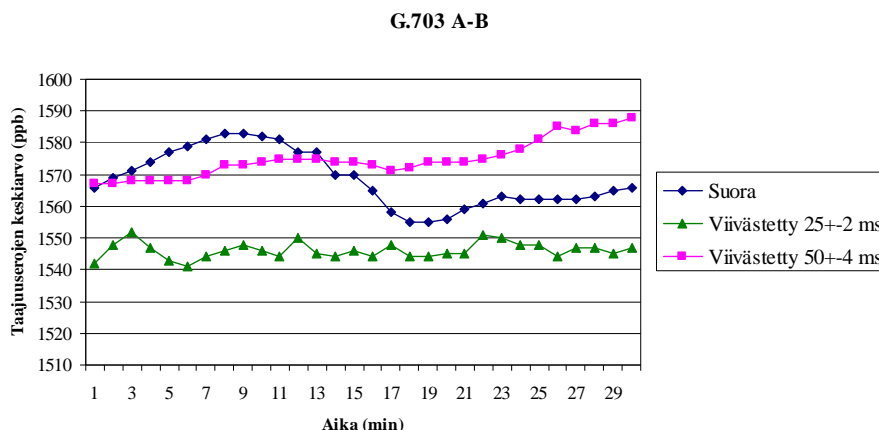
Kuva 47 G.704 taajuuserojen keskiarvot eri viivearvoilla

Vaihdettaessa laajennettuun A-B-C-D topologiaan voidaan kuvasta 48 todeta taajuuserojen pienenevän jokaisessa kolmessa tapauksessa, mutta nyt viivästetyistä 25 ± 2 ms tuottaa parhaan tuloksen. Virheen pienemisen selittänee osittain lisääntynyt pakettimäärä Ethernet-porttia kohden (jokaisen portin läpi käydään kahdesti), jolloin kellonpalautusalgoritmillä on enemmän tietoa käytössään.



Kuva 48 G.704 A-B-C-D topologian taajuuserojen keskiarvot eri viivearvoilla

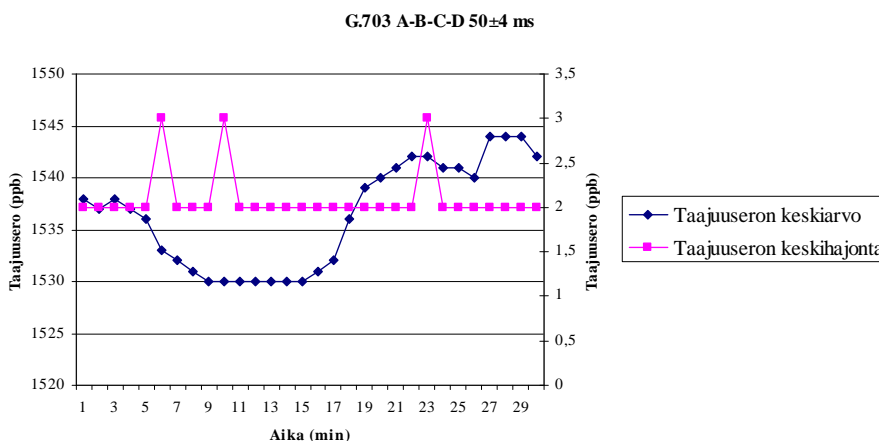
Vastaavassa kuvassa 49 G.703-liikennetyypiltä A-B topologiassa eri viivearvojen kuvaajat ovat hyvin lähellä toisiaan. Ero suurimman ja pienimmän arvon välillä on suurimmillaan noin 50 ppb. Yksittäiset MTIE-arvot ovat suoralle linkille 28 ns, 25 ± 2 ms viivästetyille linkille 11 ns ja 50 ± 4 ms viivästetyille 21 ns. Tämän perusteella viiveen määrä ei oleellisesti muuta taajuuden virhettä G.703-liikenteellä. Hieman yllättäen viiveettömällä linkillä esiintyy suurinta vaihtelua, joskin se on hidastempoista.



Kuva 49 G.703 taajuuserojen keskiarvot eri viivearvoilla

9.6.4 Pitkän mittausajan vaikutus viivästetyn liikenteen tuloksiin

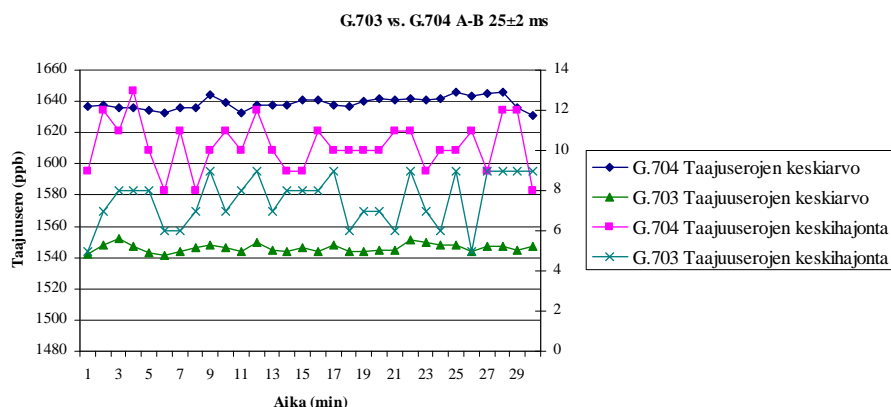
Kuvan 50 tilanteessa liikennettä on ajettu A-B-C-D topologian G.703-verkossa viivästetyllä linkillä 24 tuntia yhtäjaksoisesti. Pitkän mittausjakson vaikutuksen huomaa tarkastelemalla taajuuseron keskiarvon minimiä ja maksimia, jotka poikkeavat toisistaan enää vain noin 15 ppb verran puolen tunnin tarkastelujaksolla. MTIE arvo on siis 15 ns. Tämän tuloksen voi sanoa olevan jo hyvin stabiili, sillä keskihajonta on vakioitunut 2-3 ppb tasolle taajuuseron ollessa tyypillisellä 1540 ppb tasolla.



Kuva 50 Viivästetty G.703 linkki A-B-C-D topologiassa 24 h jälkeen

9.6.5 Viivästettyjen linkkien vertailu

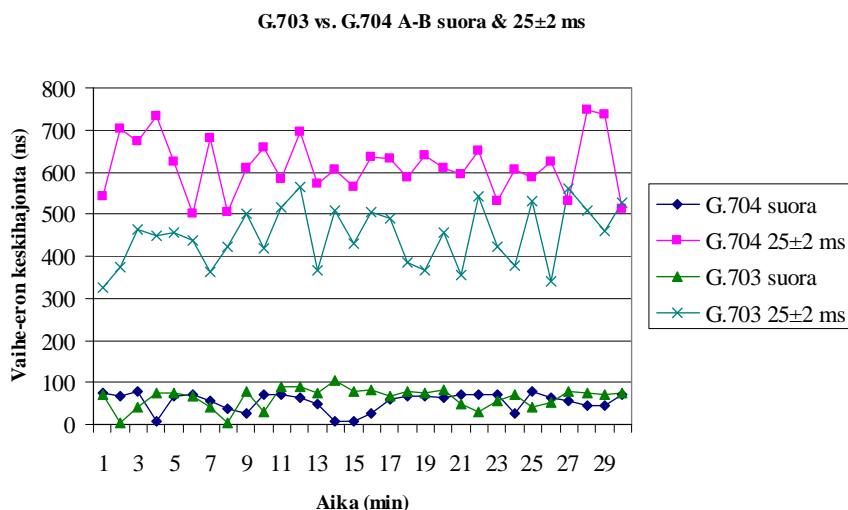
Kuvassa 51 on piirretty samaan kuvaajaan molempien liikennetyyppien perustopologiassa mitatut taajuuseroarvot 25 ± 2 ms viivästettynä. Keskiarvot ovat asettuneet noin 100 ppb:n etäisyydelle toisistaan ja ne ovat keskimäärin melko stabiileja. Signaalit eivät vaikuta vaeltavan. G.704-tyypin keskihajonta on hieman suurempaa kuin G.703:lla.



Kuva 51 G.703 ja G.704 taajuuserovertailua viivästettynä 25 ± 2 ms A-B topologiassa

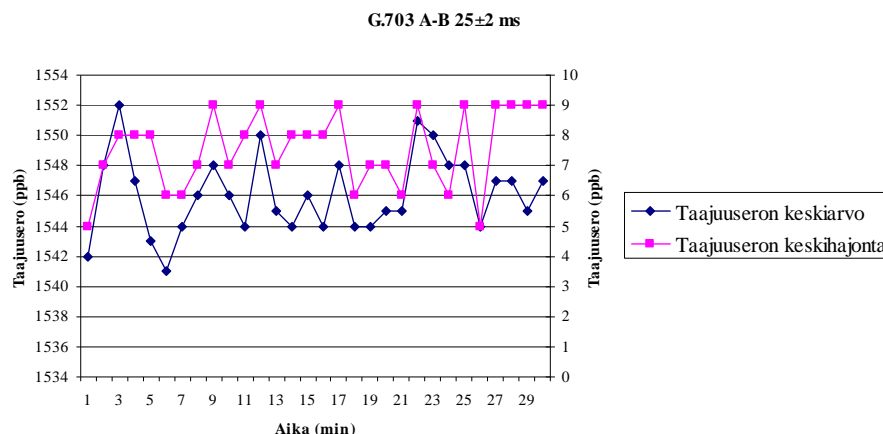
Emuloidun viiveen vaikutuksen näkee konkreettisesti vertaamalla vaihe-eron keskihajontoja suoran ja viivästetyn yhteyden välillä kuvassa 52. Suoran yhteyden tiedot ovat samasta mittauksesta kuin aiemman kuvan 42 kuormittamattomat vaihe-erot. Numeroarvoina tarkasteltuna keskihajonnat ovat G.703 tapauksessa noin kahdeksankertaiset ja G.704 tapauksessa jopa kymmenkertaiset! Suoralla yhteydellä liikennetyypeillä ei ollut merkittävää keskinäistä eroa.

Valtavat hajonnat herättävät epäilyksiä todellisten sovellusten toiminnasta vastaavassa tilanteessa. Tässä kohtaa kannattaa muistaa luvusta 4.2 kahden pulssin välinen 488 ns aikaero, joka ylittyy tulosten perusteella keskimäärin reilusti. Siten kahden peräkkäisen bitin pitäisi vaihtaa paikkaa aiheuttaen bittivirheen. Silti TDM-mittalaite ei antanut virheitä. Tulos ei kerro kuin minuutin aikaisen keskimääräisen virheen, joten peräkkäisillä paketeilla virhe voi olla rajan sisällä. Emuloitu viive ei myöskään vastaa luonteeltaan todellisessa verkoissa esiintyvää.



Kuva 52 G.703 ja G.704 vaihe-erovertailua suoralla ja viivästetyllä linkillä

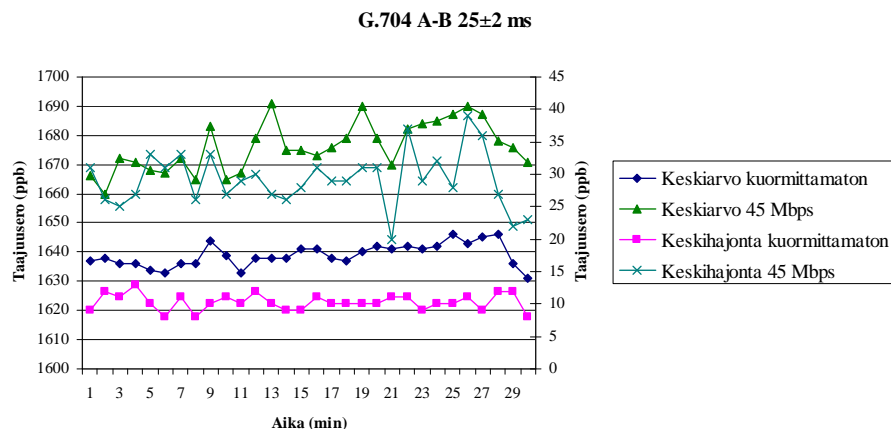
Kuvassa 53 on otettu lähempään tarkasteluun edellisten kuvien G.703-linkki. Arvot osoittavat sen olevan taajuudeltaan erittäin stabiili huolimatta vaihtelevasta viiveestä. Mittausjaksolla suurimman ja pienimmän taajuuseron keskiarvon ero on vain 11 ppb pienentyen mittausjakson loppua kohden noin puoleen. MTIE arvona se on 11 ns. Keskihajonta ei kuitenkaan merkittävästi pienene, mikä lienee viiveenvaihtelun seurausta. G.704 tapauksessa suurimman ja pienimmän arvon ero on 15 ppb, joten sekään ei ole merkittävästi huonompi.



Kuva 53 Tasalaatuinen G.703 viivästettynä 25±2 ms

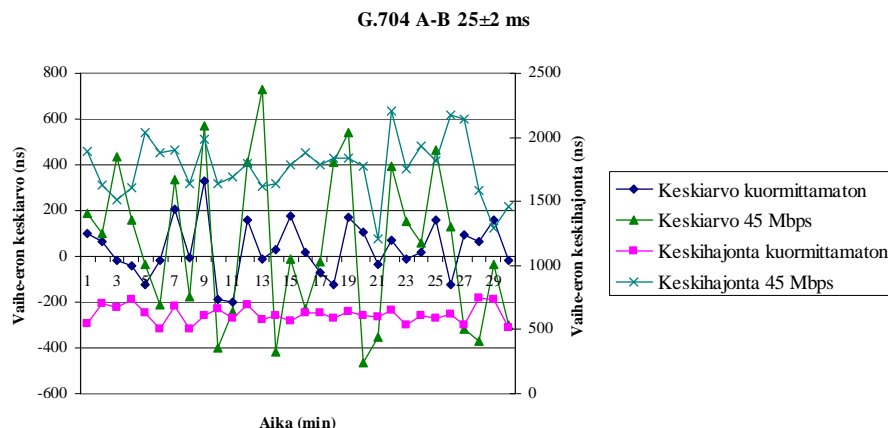
9.6.6 Viiveen ja taustaliikenteen yhteisvaikutus

Viivästetyn linkin ja taustaliikenteen yhteisvaikutuksen tutkimiseksi tarkastellaan vain G.704-tyyppistä linkkiä, sillä G.703 selvisi vain hyvin pienestä taustaliikenteestä tässä testitapauksessa. Verkkotopologiana on käytettävä perustyyppiä A-B, koska verkko-emulaatiokoneen verkkokortti ei selvinnyt laajennetun topologian liikennekuormasta taustaliikenteen kanssa. Testikokoonpano selvisi lähellä teoreettista maksimia olevasta 45 Mbps kuormasta. Taajuuseroa esittävästä kuvasta 54 nähdään taustakuorman kasvattavan keskiarvoa noin 30–50 ppb. Kuormitetun tapauksen signaali ei ole aivan yhtä vakaa. Keskihajonta on lähes kolminkertaistunut, mikä kertoo kilpailutilanteesta linkillä eri pakettien välillä.



Kuva 54 Taustaliikenteen vaikutus taajuuseroon viivästetyllä G.704 linkillä

Kuvassa 55 tarkastellaan samojen tapausten vaihe-eroja kuin edellä. Keskiarvot näyttävät käyrän muodon perusteella yllättävän samanlaisilta huippujen kohdilta, mutta kuormitettu signaali hyppii kaksin-kolminkertaisella skaalalla ääripäästä toiseen. Vaihelukittu silmukka ei juuri kykene suodattamaan vaihtelua. Kahden peräkkäisen arvon ero voi olla yli 1000 ns, mutta silti liikenne meni läpi virheittä. Keskihajonta kasvoi kuormituksen johdosta ennennäkemättömälle 1500–2200 ns tasolle. Tämän täytyy olla jo äärirajoilla yhteyden toiminnan kannalta perustuen verkkokortin asetusten haussa kerättyihin kokemuksiin keskihajonnan vaikutuksesta.

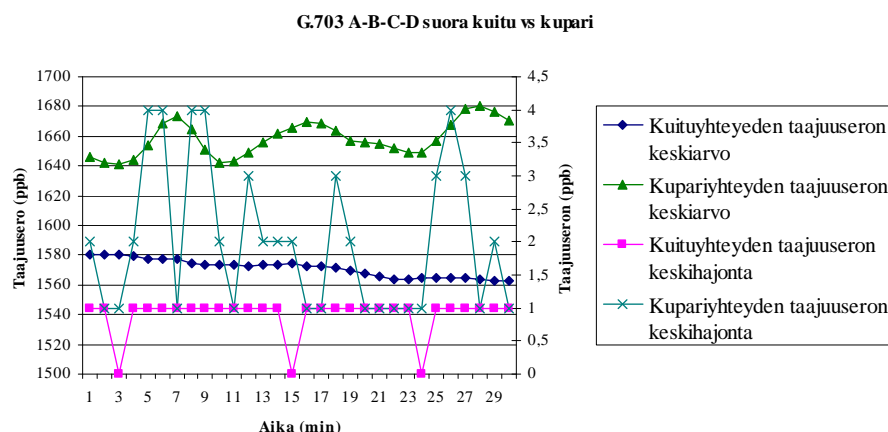


Kuva 55 Taustaliikenteen vaikutus vaihe-eroon viivästetyllä G.704 linkillä

9.6.7 Kupari- ja kuituyhteyden vertailu

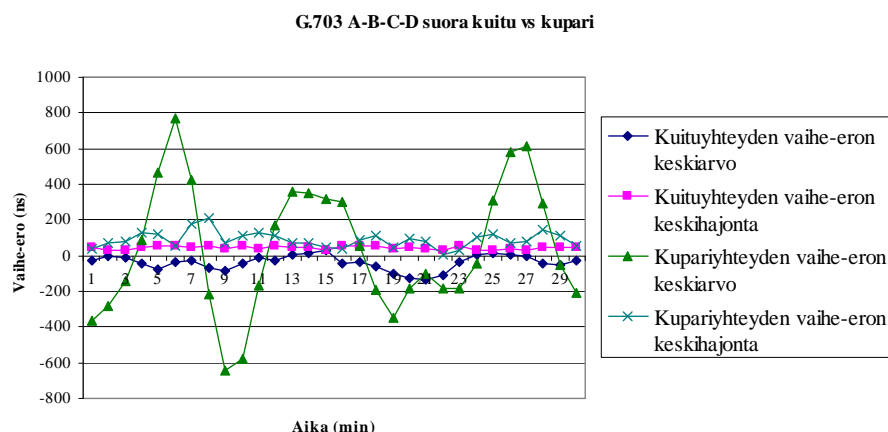
Mittausprosessin loppuvaiheessa tuli mahdollisuus kokeilla myös kuituyhteyttä laitteiden välillä SyncE-toiminnallisuuden tutustumiseksi. Tällöin laitteet oli yhdistetty suoralla lyhyellä kuidulla ilman mahdollisuuksia vaikuttaa liikenteeseen. Kuvassa 56 on vertailtu suoran kuitu- ja kupariyhteyden tuottamia tuloksia G.703-tyypin liikenteellä A-B-C-D verkkotopologiassa. Kuituyhteys toimii gigabitin nopeudella, mutta sen ei pitäisi vaikuttaa merkittävästi tuloksiin, koska taustaliikennettä ei ole käytössä. SyncE käyttävästä synkronoinnista ei ole saatavilla reitittimen kautta minkäänlaisia laatuparametreja, minkä johdosta laajamittaisempiin mittauksiin ei kannattanut lähteä.

Adaptiivista kellon palautusta voi käyttää SyncE:n kanssa rinnan, joten on mahdollista verrata kahden eri siirtomedian mahdollisia eroja. Kyseessä oli vain yksittäinen mittaus, mutta sen perusteella kuituyhteys näyttää stabiilimmalta, taajuuseroa on vähemmän ja hajonta pienempää. Taajuudessa esiintyy pientä vaellusta alaspäin, mutta kupariyhteys vastaavasti tekee jatkuvaa aaltoliikettä ja sen keskihajonta on moninkertainen ja tasoltaan vaihteleva.



Kuva 56 Kupari- ja kuituyhteyden taajuuseron vertailu G.703 A-B-C-D topologiassa

Vaihe-eroja esittävästä kuvasta 57 nähdään selkeästi, miten kupariyhteyden aaltoilu edellisessä kuvassa on yhteydessä signaalin vaiheen vaihteluun positiivisen ja negatiivisen välillä. Kuituyhteys on varsinkin vaihe-eron keskihajonnan kannalta erittäin tasalaatuinen noin 44 ns keskiarvolla. Näin pientä arvoa ei esiintynyt missään muussa testitapauksessa lyhyillä mittausajoilla.



Kuva 57 Kupari- ja kuituyhteyden vaihe-eron vertailu G.703 A-B-C-D topologiassa

9.7 Virheiden esiintyminen mittauksissa

Seuraavissa aliluvuissa käsitellään erilaisia virhetilanteita, joita mittauksia suoritettaessa kohdattiin. Luvussa 7.5 laskettiin testiverkkoon sopivat raja-arvot virheellisten sekuntien suhteelle (ESR) ja vakavasti virheellisten sekuntien suhteelle (SESR). Nämä olivat kriteerit, joilla mittaustuloksen hyväksyttävyyttä määriteltiin TDM-mittalaitteen antamista tuloksista. Vaikka suuri osa halutusta aiemman taulukon 8 testimatriisista onnistuttiin suorittamaan hyväksytysti, mahtui joukkoon myös monia mittauskertoja, jotka eivät täyttäneet vaatimuksia. Tyypillisin syy bittivirheen syntyyn oli vastaanottopuskurin alivuoto eli tyhjentyminen paketeista. Puskurin ylivuotoa esiintyi huomattavasti harvemmin.

Liikennetyyppien välisiä eroja virheiden ilmaisussa käydään läpi ja sovelletaan aiemmin teoriaosassa määriteltyjä suorituskykymittareja käytännössä. Bittivirheiden ajallisesta jakautumisesta pitkällä mittausjaksolla annetaan erikoinen esimerkki. Lisäksi näytetään, miltä bittivirheistä seuraava luiskahdus näyttää taajuuserokuvaajassa. Reitin vaihtumista pääreitiltä varareitille tutkitaan katkosta seuraavien virheiden näkökulmasta.

9.7.1 Liikennetyyppien erot ja suorituskykymittarien käyttö

Tässä kappaleessa tarkastellaan TDM-mittalaitteen antamia tuloksia suorituskykymittarien suhteen. Näin lyhyellä mittausajalla rajat ovat niin tiukat, että hieman virheilevän, mutta edes lähelle hyväksyttävän tuloksen aikaansaaminen oli hyvin vaikeaa. Liikennetyypit G.703 ja G.704 toimivat kanavoinnista johtuen hieman eri tavoin havaitessaan virheen.

Eräässä G.703-liikennetyypin suoran A-B-C-D topologian mittauksessa puolen tunnin mittausjaksolle osui kolme virheellistä sekuntia. Näistä seurasi kolme AIS-hälytystä, kolme synkronointisignaalin katoamista, kolme bittikuvion luiskahdusta ja yhteensä 98 bittivirhettä. Tällä liikennetyypillä kolmen ensin mainitun määrään lukemat olivat aina keskenään samat. Luvun 7.2 määritelmän mukaan hälytyksen sisältävä sekunti on aina myös vakavasti virheellinen sekunti, joten niiden lukumäärä on sama kolme.

Suhteuttamalla bittivirheiden määrä jakson aikana siirrettyyn bittimäärään E1-nopeudella, saadaan bittivirhesuhteeksi $2,64 \cdot 10^{-8}$. Bittivirheiden tarkkaa jakaumaa eri sekuntien kesken ei tiedetä, mutta keskimääräinen bittivirhesuhde virheellistä sekuntia kohden on noin $1,6 \cdot 10^{-6}$. Se yksin ei vielä aiheuttaisi vakavasti virheellistä sekuntia

luvun 7.2 määritelmän perusteella, jossa suhteen pitäisi olla yli 10^{-3} . ESR ja SERS arvoksi tulee kolmella virheellä 1800 sekunnin aikana 0.001667.

Vertaamalla TDM-mittarin antamaa lukemaa aiemmin laskettuun raja-arvoon 0,0037, voidaan todeta ESR:n olevan hyväksyttävällä tasolla. M.2100-standardi olisi sallinut 6 virheellistä sekuntia. SESR kuitenkin menee selvästi hylätyn puolelle jokaisessa tapauksessa, koska aiemmin todettiin rajan olevan alle yksi virhe tälle ajanjaksolle. Siten jokainen mittaus, jossa esiintyy SES tulee hylätä.

Käytettäessä testiliikenteenä kanavoitua G.704-tyyppiä käyttäytyvät virheet hieman eri tavoin. Tunnin mittaisessa A-B-C-D topologian taustaliikennettä sisältävässä mittauksessa esiintyi myös kolme (vakavasti) virheellistä sekuntia, josta muodostuu virhesuhteeksi 0.000833. Synkronointisignaali katoaa kolmeksi sekunniksi, mutta bittikuvion luiskahdusten määrä ei enää olekaan sama kuten G.703 tapauksessa vaan peräti 22. Bittivirheitä syntyy 923, mikä on lähes kymmenkertainen määrä edelliseen tapaukseen verrattuna. Bittivirhesuhteeksi muodostuu $1,34 \cdot 10^{-7}$. Tämä liikennetyyppi ei käytä AIS-häiriösignaalia virheenilmaisuun.

Jälkimmäisestä mittauksesta löytyy virheiden ajallinen jakauma, joka on esitetty taulukossa 12. Mittarin antamasta jakaumasta selviää, että bittivirheet tapahtuivat aina alle 0,1 s aikana synkronoinnin katoamisesta. Bittivirhesuhteet sekuntia kohden eivät ylitä SES raja-arvoa. Virheellisten lohkojen määrä sekuntia kohden kuitenkin ylittää tällä kertaa SES rajan (300/1000 olettaen bittivirheiden kuuluvan eri lohkoihin). Tämä selittää virheellisten sekuntien määrän kolme. G.703 tapauksessa syynä oli AIS-signaali, nyt virheelliset lohkot. Sellaista tulosta ei löytynyt, jossa ES ja SES lukemat olisivat eronneet toisistaan.

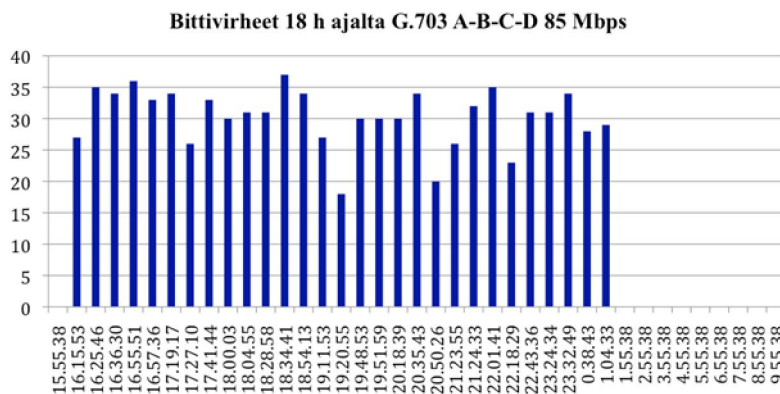
Taulukko 12 Virheiden jakautuminen G.704-tyypin mittauksessa tunnin ajalla

Synkronoinnin katoamishetki	Bittikuvion luiskahduksia	Bittivirheitä
31.40	7	317
32.38	9	305
37.26	6	301

Eräässä 12 tuntia kestäneessä G.704 testissä päädyttiin seitsemään virhetilanteeseen. Tällöin SESR sai arvon 0,000162, joka menee niukasti alle raja-arvon. Nyt mittalaite antoi hyväksytyt tulokset G.821 ja G.826 testeistä ja lisäksi M.2100 tuloksen todettiin olevan epävarma. Yksikin lisävirhe olisi tehnyt tuloksesta hylätyn. Tämän mittauksen bittivirhesuhde oli $2,24 \cdot 10^{-8}$.

9.7.2 Bittivirheiden jakautuminen pitkällä mittausajalla

Aiemmin kappaleen 9.6.2 kuvassa 45 esiintyi taajuuserokuvaaja G.703 tyyppin viiveettömällä linkillä ja 85 megabitin taustaliikenteellä suoritetusta mittauksesta laajemmassa A-B-C-D topologiassa. Graafin arvot oli otettu yli 18 tuntia kestäneen yhtäjaksoisen mittauksen jälkeen. Tämän todettiin alkaneen negatiivisesta taajuuserosta ja eron kasvaneen tasaisesti kohti tyypillisempiä lukemia. Sama esimerkki mittaus on kuitenkin myös esimerkki tilanteesta, jossa aluksi hyvinkin paljon virheilevä yhteys voi muuttua vakaaksi kun aikaa kuluu tarpeeksi. Tässä tapauksessa vaadittu aika oli yli 9 tuntia! Ensimmäisen 9 tunnin aikana virhetapahtumia oli 29, mutta jälkimmäisellä ei enää yhtään. Ilmiö perustuu taajuuseron korjautumiseen ajan kuluessa sopivalle tasolle.

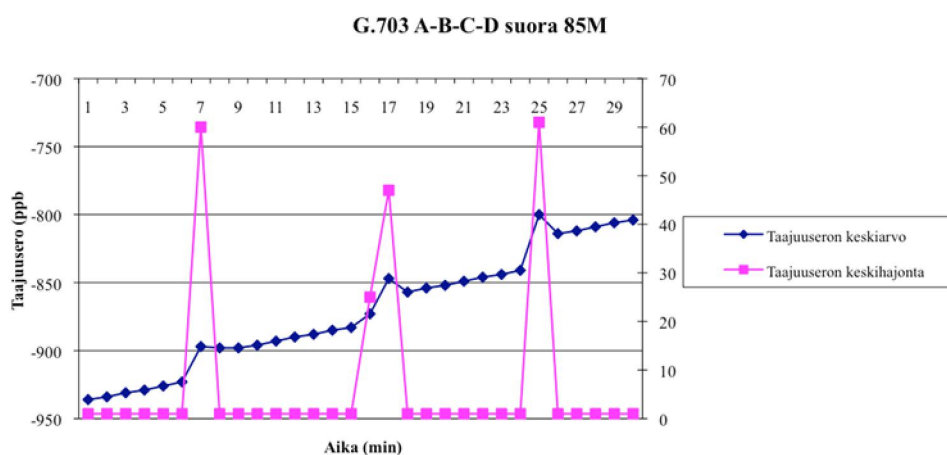


Kuva 58 Bittivirheiden ajallinen jakauma 18 tunnin ajalta

Bittivirheiden ajallista jakaumaa havainnollistaa kuva 58. Ensimmäisten neljän tunnin aikana virheitä tapahtuu 4-5 kertaa tunnissa, vähentyen sitten 2-3 kertaan ja lopulta loppuen kokokaan.

9.7.3 Tasaisesti esiintyvä luiskahtelu

Liikennetyypillä G.703 oli joskus tapana päätyä mittauksen alkaessa tilaan, jossa taajuusero oli selvästi normaalista poikkeava. Tämä oli erityisesti laajennetun A-B-C-D topologian ongelma. Tällöin seurasi usein myös hyvin tasaisin välein tapahtuvia bittivirheitä eli luiskahduksia laitteen kellon pyrkien hakeutumaan takaisin sopivalle taajuuseroalueelle. Vaihe-erotilasto näyttää yli 1500 ns lukemia kuvan 59 hyppyjen kohdilla, normaaliarvon ollessa noin 175 ns. Kuvasta nähtävä luiskahdustiheys on edelleen kaukana aiemmin tässä luvussa esitetyistä laskennallisista huonoimman tapauksen arvoista. Testitapaus on sama, mutta mittaukselta on eri kuin edellisessä virheiden ajallista jakaumaa esittävässä kuvassa 58.



Kuva 59 Tasaisin väliajoin luiskahteleva mittaus

Korjauksena tilanteeseen voi toimia TDM-mittalaitteen nollaus, asetusten vaihtaminen reitittimestä toiseksi tai pahimmillaan vain tuntien odotus, jotta taajuus asettuu luontaisesti normaalimmalle tasolle.

9.7.4 Reitin vaihtumisesta (linkkikatkoista) syntyvät virheet

Testikokoonpano oli rakennettu siten, että viivästetyltä linkiltä voitiin siirtyä suoralle linkille ja takaisin automaattisesti irrottamalla tai kytkemällä kaapeli liittimeen. Näin oli mahdollista simuloida reitin vaihtumista tai linkin katkeamista kesken siirron. TDM-mittalaitteelta voitiin seurata, montako ja minkälaisia virheitä vaihtohetkellä tapahtuu. Katkoksen pituuden määrittely oli mahdollista vain suurpiirteisesti johtuen tilastojen ilmoitustavasta. Seuraavaksi on esitetty pari esimerkkitapausta.

Siirryttäessä kupariyhteydeltä toiselle päästiin yleensä yhdellä tai kahdella virheellisellä sekunnilla. Tapauksissa, jossa palattiin varareitiltä pääreitille ei välttämättä tapahtunut katkoa ollenkaan, mikäli ajoitus oli onnistunut. Hieman vastaavan vaikutuksen sai muuttamalla verkkoemulaattorin viivearvoa kesken mittauksen. Seurauksena oli kolme virheellistä sekuntia hetkellisen siltauksen katkoksen myötä. Bittivirheitä saattoi tulla pari tuhattakin, mikä ylitti selvästi reitinvaihdosta syntyneet määrät, jotka laskettiin kymmenissä tai reilussa sadassa. Tämä selittynee verkkokortin puskurista katoavalla tiedolla ja sillä ettei lähettävä reititin osaa reagoida heti tilanteeseen samoin kuin sen omien porttiansa kohdalla.

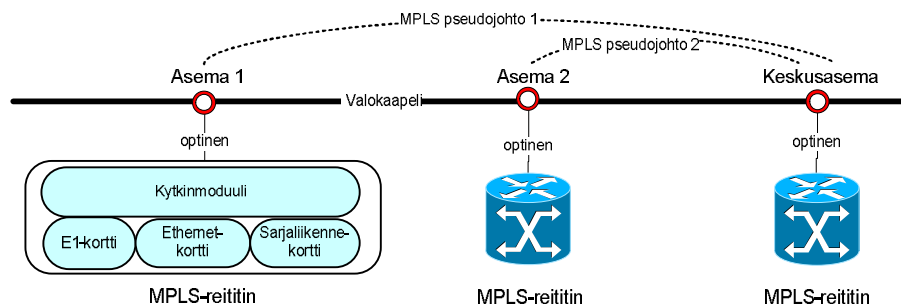
Käytettäessä viivästettynä linkkinä kuparikaapelia ja ideaalireittinä kuitua, havaittiin melkoinen ero sen mukaan kumpaan suuntaan siirryttiin. Kuparikaapelin irroitus sai aikaan 11 virheellistä sekuntia ja noin 11,7 sekunnin mittaisen katkon liikenteeseen ennen kuidulle siirtymistä. Virheellisiä bittejä tuli esimerkiksi 125. Palautus kuidulta kuparille sitä vastoin kesti vain 4,7 sekuntia tuottaen yhden virheellisen sekunnin mittariin. Nyt bittivirheiden määrä oli 153 ollen näin suurempi kuin toiseen suuntaan.

Yhteyden katkaisu ja varayhteyden käyttöönoton odottelu tuo luonnollisesti enemmän virheellisiä sekunteja verrattuna tilanteeseen, jossa varayhteys on kokoajan kytkettynä ja siltä siirrytään vain takaisin pääyhteydelle. Silti 11 sekuntia vaikuttaa erittäin pitkältä ajalta. Tilanteeseen voi kenties vaikuttaa ottamalla käyttöön erityisiä nopean toipumisen menetelmiä. Osasyynä eroon lienee eri medioiden toisistaan poikkeavat siirtonopeudet. Kupariyhteys oli nopeudeltaan 100 Mbps ja kuituyhteys 1 Gbps.

9.8 Pakettiverkkopohjainen ratkaisumalli sarjaliikennelaitteiden verkottamiseen

Tässä luvussa esitellään yksi ratkaisuvaihtoehto luvussa 2.2 esitetyn nykyisen sarjaliikenneyhteyksien toteutuksen modernisoimiseksi pakettiverkkopohjaiseksi käyttäen tässä työssä esille tulleita tekniikoita. Peruseriaate uudistetusta verkkoinfrastruktuurista kuvan 4 rataverkon yhteysvälille on esitetty kuvassa 60. Vasemmanpuoleiseen reitittimeen on eritelty yleisimmin tarvittavat Ethernet-, Sarjaliikenne- ja E1-liitäntäkortit.

Väliasemat on yhdistetty keskusasemaan käyttäen ns. pseudojohtoja, joissa sarjaliikenne kulkee pakettimuodossa kahden pisteen välillä. Tässä ratkaisussa runkoyhteyden nopeus voidaan nostaa esimerkiksi gigabittiin sekunnissa, jolloin samasta kuituparista saadaan huomattavasti enemmän kapasiteettia käyttöön kuin PDH-tekniikalla olisi mahdollista nykytoteutuksessa. Tämä mahdollistaa lisäpalveluiden toteutuksen käyttäen vanhaa kaapeli-infrastruktuuria. Runkoyhteyden kuormitus ei ole tasainen koko yhteysvälillä, vaan kuorma keskittyy keskusasemaa kohden, jossa rinnakkaisia pseudojohtoja kulkee eniten.



Kuva 60 Ethernet-tekniikkaan perustuva siirtoverkkototeutus sarjaliikennelaitteen verkottamiseen hyödyntäen pseudojohtoemulaatiotekniikkaa

Yllä kuvatun kaltaisessa verkossa synkronointisignaali voidaan tuoda piirikytkentäisiä verkkoja käyttäen laiteketjun molempiin päihin. Pakettiverkossa toimivien laitteiden välillä signaalin jako onnistuu parhaiten adaptiivisilla kellonpalautusmenetelmillä tai käyttäen synkronista Ethernetiä, olettaen ettei signaalia ole tarjolla ketjun välipisteissä. Tässä mallissa SyncE on selkeästi vahvoilla, koska laitteet ovat valmiiksi ketjussa, jonka jokainen osa on tarpeen uusia. Kuormituksesta riippumaton suorituskyky tarjoaa oletusarvoisesti paremman synkronointituloksen kuin adaptiiviset menetelmät, joihin muun liikenteen määrä vaikuttaa.

10 Yhteenveto

Tässä diplomityössä käytiin läpi ratkaisuja, joilla sarjamuotoista ja aikajakoisesti kanavoitua tietoa voidaan siirtää pakettiverkoissa käyttäen hyväksi pseudojohtoemulaatiota. Erityistä huomiota kiinnitettiin ratkaisuihin, joilla voidaan hoitaa verkon synkronisointi pakettiverkoissa. Työssä oli mahdollista testata laitteistoa, josta löytyy tuki pseudojohtoemulaatiotekniikoille CESoPSN ja SAToP. Laitteet voidaan synkronoida käyttäen adaptiivista kellonpalautusta, synkronista Ethernetiä, PTP-protokollaa tai ulkoista synkronointilähdettä. Näistä vaihtoehdoista testeissä keskityttiin adaptiiviseen kellonpalautukseen ja pyrittiin selvittämään, minkälaista laatua se vaatii pakettiverkolta. Verkkoon emuloitiin keinotekoisia viivettä ja viiveen vaihtelua PC-laitteistolla. Seuraavassa luvussa käydään läpi mittauksista tehtyjä johtopäätöksiä.

10.1 Johtopäätökset

Mittauksia tehdessä tuli hyvin selville, että tulokset ovat juuri niin hyviä kun käytetyt välineet. Kaksi suurinta vaikutinta saavutettavia taajuustarkkuuksia tarkastellessa ovat mittalaitteen syöttämä testisignaalin laatu ja verkkoemulaattorin tuottaman viiveen tasaisuus. Siihen vaikuttavat pääasiassa käyttöjärjestelmän ja verkkokortin asetukset. Tyypillisesti tulos oli joko selvästi hyväksyttävä tai selvästi liikaa virheilevä. Vain hieman virheilevän ympäristön luominen osoittautui vaikeaksi lyhyillä mittausajoilla. Mitattavat suureet ovat tarkkuuksiltaan niin suuria, että pienetkin asiat voivat vaikuttaa tulokseen ja mukana on aina tiettyä satunnaisuutta.

Tulokset ovat suoraan verrannollisia emulaattorin toimintaan, minkä näkee verratessa viivästämättömään suoraan yhteyteen. Signaalin stabiiliutta arvioitaessa ideaaliverkon tulos ei silti ollut aina paras varsinkaan tyhjässä verkossa mitatessa. Yleisesti voidaan sanoa kehystämättömän G.703 liikennetyypin olleen herkempi ongelmille kuin kehystetyn G.704:n. Ensin mainitulla oli vaikeampaa saada aikaan vakaita virheettömiä mittauksia. Kahdesta mittaustopologiasta kahden reitittimen välinen "A-B" täytti tarkoituksensa hyvin. Laajennettu "A-B-C-D" topologia sitä vastoin antoi useammin yllättäviä tuloksia ja sen toiminnan tarkka analysointi ongelmia etsittäessä oli huomattavan vaikeaa johtuen yhteisestä pakettiverkon rajapinnasta kahden eri samaan yhteyteen kuuluvan TDM-portin kesken samassa laitteessa.

Mittausten tuloksena voidaan sanoa, että E1-käytössä verkko saadaan toimimaan ilman bittivirheitä hyvinkin haastavissa olosuhteissa, mutta tulos ei ole joka mittauksella yhtä hyvä. Saavutetun pitäisi riittää vanhoille nykyisin PDH-yhteyksien yli käytettäville sovelluksille. Matkapuhelinverkkokäytön vaatimiin tarkkuuksiin ei näillä mittauksilla ollut mahdollista päästä, mutta kansainväliset vertailut osoittavat siihenkin käyttöön vaadittavan laadun olevan saavutettavissa oikeanlaisessa ympäristössä.

Vaihe-ero vaihelukitus silmukassa kertoo verkon viiveestä. Suurempi viive tuottaa suuremman vaihe-eron ja muuttuva viive saa vaiheen heilumaan. Ennen kaikkea liian suureksi kasvava vaihe-ero tai selvät askeleet vaiheessa saavat aikaan synkronoinnin väliaikaisen tippumisen pois normaalitilasta. Pelkällä viiveellä ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta yhteyden toimintaan, eikä realistisista viivearvoista löytynyt ylärajaa toiminnalle. Viiveen vaihtelu sitä vastoin saa aikaan välittömästi ongelmia, mikäli se ylittää reitittimen vastaanottopuskurin koon. Toisaalta myös ylimitoitettu puskuri vaikutti huonontavan tuloksia viiveeseen hyvin sopivaan puskuriin nähden.

RS-232 on liikennetyyppinä hyvin yksinkertainen, eikä se vaadi verkolta muuta kuin riittävän kapasiteetin ja liikenteen priorisoinnin pakettihukan ehkäisemiseksi. Puskuroinnit ovat niin paljon suuremmat kuin E1-käytössä, että jälkimmäisen toimiessa toimii myös RS-232. Synkronoinnin saavuttamiseen riitti mainiosti reititinten sisäinen kello.

Alusta aloittamalla saisi mittausjärjestelystä mahdollisesti pienin parannuksin ulos parempia tuloksia panostamalla enemmän tietokoneen arkkitehtuurista johtuvien rajoitteiden hienosäätöön. Nyt viiveen tuotossa jouduttiin tyytymään kompromissiin, jossa viive ei kohdistu varsinaiseen synkronointiliitántään vaan ainoastaan liikennöintiliitántään yhteyden paluusuunnassa. Molempien siirtosuuntien kulkiessa saman verkkokortin läpi siltaavassa laitteessa nähtiin kuitenkin viiveen vaihtelusta selvä vaikutus yhteyden laatuun. Muiden kuin viiveeseen liittyvien virhetilanteiden kokeiluun jäi vähän aikaa ja niistä voisi saada enemmän tietoa. Silloin olisi tarpeen määritellä perustellusti realistiset virheilyn tasot, mikä ei ole yksinkertaista.

Yleisesti voidaan sanoa mittausten olevan heikosti toistettavia, sillä taajuusero asettui mittauskerrasta riippuen hyvinkin eri kohtaan lyhyen aikavälin mittauksissa, tapauksissa joissa asetuksia oli välillä vaihdettu toisiksi. Asetusten pitäminen samoina pitkiä aikoja edisti huomattavasti laadukkaan tuloksen saantia, mikä selittyy reitittimen muistamisominaisuudella. Synkronoinnin ylläpito ilman ulkoista kellosignaalin lähettä vaatii riittävän pitkää historiatietoa signaalin tasosta. Asetusten muutos saa aikaan selvää eroa entiseen, minkä johdosta laite ryhtyy korjaamaan muutosta. Kärsivällisyys onkin paras hyve laadukkaiden mittautulosten aikaansaamiseksi.

Huolellinenkaan etukäteisvalmistelu ei välttämättä auta ennalta tuntemattomien laitteiden kanssa. Hyvinkin yksinkertaisen ongelman ratkaisuun voi kulua tunteja selvittäessä asioiden välisiä riippuvuussuhteita. Reitittimessä on pelkästään yhtä porttia tai palvelua kohti olemassa sivuittain laskureita ja seurantakomennoilla useita esitystarkkuuksia asioille. Ohjekirjat etteivät selitä kaikkea tarkasti. Oikeisiin asioihin osaa kiinnittää huomiota vasta kokemuksen ja kokeilujen kautta.

10.2 Jatkokehityskohteet

Työssä keskityttiin vain laboratoriossa suoritettuihin testeihin rakenteeltaan todellista verkkoa vastaamattomissa olosuhteissa. Tärkein kehityskohde on viedä laitteisto käyttöympäristöön, jossa on tarjolla vaatimukset täyttävä referenssisignaali. Tällöin laitteille syötetty synkronointisignaali on huomattavasti tarkempi ja tulokset ovat paremmin verrannollisia saatavissa oleviin referenssituloksiin.

Siirtolaitteita vertailtaessa kävi ilmi, että nykyisessä verkossa käytössä olevissa laitteissa on ainakin kahta erilaista ulkoisen synkronoinnin fyysistä liitántää, joista kumpikaan ei ole sama kuin tutkitussa reitittimessä. Siten tarvittaneen sovitusratkaisuja, jos kyseistä liitántää halutaan käyttää. Signaalin muoto on kaikissa sama G.703.

Maantieteellisesti toisistaan erillään olevilla sijaintipaikoilla voidaan tutkia todellisesta verkosta aiheutuvien viiveiden vaikutusta adaptiivisen kellonpalautusalgoritmin toimintaan. Tällöin päästään eroon verkkoemulaatiosta aiheutuvista epävarmuustekijöistä.

Todellisten piirikytkentäisten sovellusten koekäyttö pseudojohtoemuloidun verkon yli on tärkein mittari järjestelmän soveltuvuudesta käytännön toteutuksiin. Tällöin asetukset voidaan säätää kiinteästi tiettyyn käyttötarkoitukseen sopiviksi ja mittauksia voidaan tehdä pidemmällä aikajaksolla. Tämän tulisi parantaa kellosignaalin vakautta, koska kellonpalautusalgoritmit perustuvat osittain menneisyydestä kerättyihin historiatietoihin.

Lähteet

- [1] Valdar, A. *Understanding Telecommunications Networks*. IET Telecommunications Series 52, Lontoo, 2006
- [2] Giguere B. *Testing Life Cycle of a Mobile Backhaul Network*. Verkkodokumentti. Viitattu 3.3.2010. Saatavissa: <http://documents.exfo.com/appnotes/anote206-ang.pdf>
- [3] Chundury R. *Ericsson Review 3/2008: Mobile broadband backhaul: Addressing the challenge*. Ericsson 2008. Verkkodokumentti. Viitattu 11.3.2009 Saatavissa: http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2008_03/files/Backhaul.pdf
- [4] Infonetics Research: *Microwave Equipment Market Outlook*. Verkkodokumentti. Viitattu 10.3.2010. Saatavissa: <http://www.infonetics.com/pr/2008/microwave-equipment-market-research-highlights.asp>
- [5] Bregni, S: *Synchronization of digital telecommunications networks*, Wiley, 2002.
- [6] Nokia DYNANET Data interface unit datasheet. Nokia-Siemens-Networks, 2007
- [7] Campbell, J. V.24 RS-232 Kytännät. Pagina, 1990.
- [8] ITU-T Recommendation V.24. *List of definitions for interchange circuits between data terminal equipment (DTE) and data circuit-terminating equipment (DCE)*, 1996.
- [9] Reynders, D. Mackey, S. ja Wright, E. *Practical Industrial Data Communications: Best Practice Techniques*. Burlington, Massachusetts, Elsevier, 2005.
- [10] Grayson, M. Shatzkamer, K. ja Wainner, S. *IP Design for Mobile Networks*. Cisco Press, 2009.
- [11] Luoma, M. *Teletekniikan perusteet luentomateriaali*, Teknillinen korkeakoulu, 2000. Verkkodokumentti. Viitattu 30.4.2010. Saatavissa: <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s00/oppimateriaali.shtml>
- [12] GFI 9501 ED 4. *Guidelines for Implementation; Synchronization of the digital telecommunication network*. Ficora, 2008
- [13] ITU-T Recommendation G.810. *Definitions and terminology for synchronization networks*, 1996
- [14] ITU-T Recommendation G.823. *The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy*, 2000
- [15] ETSI TS 145 010. *GSM: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); Radio system synchronisation*, ETSI, 2001
- [16] ETSI TS 125 402. *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Synchronisation in UTRAN Stage 2*, ETSI, 2001
- [17] ANSI T1.101-1987, *Synchronization Interface Standards for Digital Networks*, 1987.
- [18] ITU-T Recommendation G.811. *Timing characteristics of primary reference clocks*, 1997

- [19] ITU-T Recommendation G.812. *Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks*, 2004
- [20] ITU-T Recommendation G.813. *Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC)*, 2003
- [21] ITU-T Recommendation G.803. *Architecture of transport networks based on the synchronous digital hierarchy (SDH)*, 2000.
- [22] Gardner, F. M. *Phaselock techniques*, Wiley, 2005.
- [23] ITU-T Recommendation G.8261. *Timing and synchronization aspects in packet networks*, 2006.
- [24] ITU-T Recommendation Y.1413. *TDM-MPLS network interworking - User plane interworking*, 2004.
- [25] RFC 3985. *Pseudowire Emulation Edge-to-Edge (PWE3)*, IETF, 2005.
- [26] Viestintävirasto. *Standardointi: ITU-T*. Verkkodokumentti. Viitattu: 10.5.2010. Saatavissa: <http://www.ficora.fi/index/palvelut/palvelutaiheittain/standardointi/itut.html>
- [27] RFC 3233. *Defining the IETF*. IETF, 2002
- [28] RFC 3935. *A Mission Statement for the IETF*. IETF, 2004.
- [29] IETF. *About the IETF*. Verkkodokumentti. Viitattu: 10.5.2010. Saatavissa: <http://www.ietf.org/about/>
- [30] RFC 2026. *The Internet Standards Process - Revision 3*. IETF, 1996.
- [31] Metro Ethernet Forum. *About the MEF*. Verkkodokumentti. Viitattu 10.5.2010. Saatavissa: <http://metroethernetforum.org/AbouttheMEF>
- [32] MEF 3: *Circuit Emulation Service Definitions, Framework and Requirements in Metro Ethernet Networks*, Metro Ethernet Forum, 2004
- [33] MEF 8: *Implementation Agreement for the Emulation of PDH Circuits over Metro Ethernet Networks*, Metro Ethernet Forum, 2004.
- [34] MEF 18: *Abstract Test Suite for Circuit Emulation Services*, Metro Ethernet Forum, 2007
- [35] RFC 3036. *LDP Specification*. IETF, 2001.
- [36] RFC 4197. *Requirements for Edge-to-Edge Emulation of Time Division Multiplexed (TDM) Circuits over Packet Switching Networks*. IETF, 2005.
- [37] RFC 4553. *Structure-Agnostic Time Division Multiplexing over IP*. IETF, 2006
- [38] RFC 5086. *Circuit Emulation Services over Packet-Switched Networks (CESoPSN)*. IETF, 2007.
- [39] ITU-T Recommendation Y.1453. *TDM-IP interworking - User plane interworking*, 2006.
- [40] RFC 5087. *Time Division Multiplexing over IP (TDMoIP)*. IETF, 2007.
- [41] ITU-T Recommendation Y.1414. *Voice services - MPLS network interworking*, 2004.
- [42] ITU-T Recommendation I.366.2 *AAL type 2 service specific convergence sublayer for narrow-band services*, 2000.

- [43] RFC 4385. *Pseudowire Emulation Edge-to-Edge (PWE3) Control Word for Use over an MPLS PSN*, IETF 2006
- [44] RFC 4446. *IANA allocations for Pseudowire Edge to Edge Emulation (PWE3)*, IETF 2006
- [45] RFC 3916. *Requirements for Pseudo-wire Edge to Edge Emulation (PWE3)*, IETF 2004
- [46] Ernhofer, B. ja Frost, T. *Circuit Emulation Services-over-Packet and Standards Adaption*. Verkkodokumentti. Analog Zone, 2004. Viitattu 13.6.2010. Saatavissa: <http://www.analogzone.com/nett1025.pdf>
- [47] RFC 4447. *Pseudowire Setup and Maintenance Using the Label Distribution Protocol (LDP)*. IETF, 2006.
- [48] Alcatel-Lucent. *7705 Service Aggregation Router OS Guide*. Elektroninen käyttöopas. Alcatel-Lucent, 2009.
- [49] Väänänen, J. *Adaptiivinen kellon synkronointi algoritmi pakettikytkentäisessä verkossa*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2008.
- [50] IEEE Standard 1588-2008. *IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*.
- [51] ITU-T Recommendation G.8264. *Distribution of timing information through packet networks*, 2008
- [52] ITU-T Recommendation G.8262. *Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock (EEC)*, 2007
- [53] Murray, C. *Tutorial on T1/E1 Alarming, Dropping, and Inserting*. EE Times, 2003. Verkkodokumentti. Viitattu 1.9.2010. Saatavissa: <http://www.eetimes.com/electronics-news/4139305/Tutorial-on-T1-E1-Alarming-Dropping-and-Inserting>
- [54] ITU-T Recommendation G.775. *Loss of Signal (LOS), Alarm Indication Signal (AIS) and Remote Defect Indication (RDI) defect detection and clearance criteria for PDH signals*, 1998
- [55] ITU-T Recommendation G.821. *Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an integrated services digital network*, 2002
- [56] ITU-T Recommendation G.826. *End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections*, 2002
- [57] ITU-T Recommendation G.827. *Availability performance parameters and objectives for end-to-end international constant bit-rate digital paths*, 2003
- [58] ITU-T Recommendation O.150. *General requirements for instrumentation for performance measurements on digital transmission equipment*, 1996
- [59] ITU-T Recommendation O.151. *Error performance measuring equipment operating at the primary rate and above*, 1992
- [60] Alpert, A. *Understanding ITU-T Error Performance Recommendations*. JDSU, 2006. Verkkodokumentti. Viitattu 29.3.2010. Saatavissa http://www.jdsu.com/product-literature/ITU_errorperf_an_ae.pdf
- [61] ITU-T Recommendation M.2100. *Performance limits for bringing-into-service and maintenance of international multi-operator PDH paths and connections*, 2003

- [62] International Organisation for Standardisation (ISO). *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*. Geneva, 1993.
- [63] IEEE Standard 1139-1999. *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology - Random Instabilities*. DOI 10.1109/IEEESTD.1999.90575
- [64] Raatikainen, P. *Välitystekniikka luentomateriaali*, Teknillinen korkeakoulu, 2008. Verkkodokumentti. Viitattu 20.10.2010. Saatavissa: http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s383165/2008/Luentomat/L7_slides.pdf
- [65] Iperf - *Verkon kaistanleveyden mittaustyökalu*. DAST/NLANR, 2008. Saatavissa: <http://iperf.sourceforge.net>
- [66] Netem - *Linux pohjainen verkkoemulaattori*. The Linux Foundation, 2009. Saatavissa: <http://www.linuxfoundation.org/collaborate/workgroups/networking/netem>
- [67] Nussbaum, L. Richard, O. *A Comparative Study of Network Link Emulators*. Verkkodokumentti. Spring Simulation Multiconference Article 85/2009. Society for Computer Simulation International, San Diego, California, USA.
- [68] Wireshark - *Paketin kehysrakenteen kaappaus- ja analysointityökalu*. Cace Technologies, 2010. Saatavissa: <http://www.wireshark.org/>
- [69] Intel Application Note 450: *Interrupt Moderation Using Intel GbE Controllers*. Revision 1.2. Verkkodokumentti. Intel Corporation, 2007. Viitattu 28.4.2010. Saatavissa: <http://download.intel.com/design/network/applnots/ap450.pdf>
- [70] Smith, S.W. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. California Technical Pub, 1999.
- [71] Van Valzah, R. Montgomery, T. ja Bowden, E. *Topics in High-Performance Messaging - Latency from Interrupt Coalescing*. Verkkodokumentti. 29West Inc., 2010. Viitattu: 28.4.2010. Saatavissa: <http://www.29west.com/docs/THPM/latency-interrupt-coalescing.html>
- [72] IEC 60834-2. *Performance and testing of teleprotection equipment of power systems - Part 2: Analogue comparison systems*. International Electrotechnical Commission, 1993

Liitteet

Liite 1 ITU-T ja ANSI kellomääritysten vertailu

ITU-T	PRC [G.811]	Type II [G.812]	Type I [G.812]	Type V [G.812]	Type III [G.812]	Type VI [G.812]	Type IV [G.812]	Option 1 [G.813]	Option 2 [G.813]	ei ole	ei ole
ANSI	Stratum 1 (PRS) [T1.101]	Stratum 2 [T1.101]	ei ole	TNC [T1.101]	Stratum 3E [T1.101]	ei ole	Stratum 3 [T1.101]	ei ole	SMC [T1.105.09]	Stratum 4E [T1.101]	Stratum 4 [T1.101]
Taajuustarkkuus per vuosi	1×10^{-11}	$\pm 1,6 \times 10^{-8}$	-	1×10^{-7} (ANSI) / - (ITU)	$\pm 4,6 \times 10^{-6}$	-	$\pm 4,6 \times 10^{-6}$	$\pm 4,6 \times 10^{-6}$	$\pm 20 \times 10^{-6}$	$\pm 32 \times 10^{-6}$	$\pm 32 \times 10^{-6}$
Ylläpitotilan stabiilisuus	-	$\pm 1 \times 10^{-10}$ /päivä	$\pm 2,7 \times 10^{-9}$ / päivä	$\pm 1,5 \times 10^{-9}$ /päivä	$\pm 1 \times 10^{-8}$ /päivä	$\pm 3 \times 10^{-8}$ /päivä	$\pm 3,7 \times 10^{-7}$ /päivä	$\pm 2 \times 10^{-6}$ /päivä	$\pm 4,6 \times 10^{-6}$ /päivä	$\pm 32 \times 10^{-6}$	-
Lukittumisalue	-	$1,6 \times 10^{-8}$	1×10^{-8}	1×10^{-7} (ANSI) / - (ITU)	$4,6 \times 10^{-6}$	-	$4,6 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-6}$	20×10^{-6}	-	32×10^{-6}
Max Wander	-	0,001 Hz	0,003 Hz	0,1 Hz	0,001 Hz	0,1 Hz	3 Hz	1-10 Hz			
Luiskahdustiheys	72 pv	7 pv	6,5 h	11,5 h	3,5 h	70 min	6 min	1 min	27 s		4 s

Liite 2 CESoPSN-kehystys G.704 liikenteelle 30 aikavälillä ja kanavakohtaisella merkinannolla

Frame 3 (521 bytes on wire, 521 bytes captured)
Ethernet II, Src: Alcatel_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2), Dst: Alcatel_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92)
Destination: Alcatel_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92)
Source: Alcatel_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2)
Type: MPLS label switched packet (0x8847)
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131070, Exp: 5, S: 0, TTL: 255
MPLS Label: 131070
MPLS Experimental Bits: 5
MPLS Bottom Of Label Stack: 0
MPLS TTL: 255
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131063, Exp: 5, S: 1, TTL: 255
MPLS Label: 131063
MPLS Experimental Bits: 5
MPLS Bottom Of Label Stack: 1
MPLS TTL: 255
PW Ethernet Control Word
Sequence Number: 23800
Data (495 bytes)

0000	00 25 ba 2e d7 92 00 25 ba 2e e4 d2 88 47 1f ff	.%.%.G..
0010	ea ff 1f ff 7b ff 00 00 5c f8 92 3c 93 74 94 c4	....{... \...<.t..
0020	85 64 e0 a5 bc 22 77 32 cd 51 50 18 1f af be 1e	.d... "w2.QP....
0030	7b ba e6 61 aa ba 00 63 fe b7 f8 4f ee 5f 9a 3e	{..a...c...0...>
0040	a3 78 34 ef 45 9c 62 b6 b0 48 5e 4e 3a 5b 62 24	.x4.E.b..H^N:[b\$
0050	b3 24 55 26 01 2b f9 07 e9 ef 8b 9e c6 b9 68 68	.\$U&.+.....hh
0060	8e 8c d8 d5 2d 01 11 f9 9b ea a7 80 2e ff 19 fd-.....
0070	ab f2 07 d3 ef 17 9d 8e b2 d8 51 2e 19 1b a9 a6	.....Q.....
0080	0a 2b c3 07 75 ec c3 95 76 80 c8 fd 4d f0 53 de	.+.u...v...M.S.
0090	17 3b 8d 66 d0 a9 1c 09 b7 ca 4f 42 5c 72 36 d3	.;.f.....0B\r6.
00a0	49 14 49 86 4a ea 41 82 7a f2 e1 d1 bb 1a 65 a2	I.I.J.A.z.....e.
00b0	a2 30 33 5f 54 3c 07 77 ec cf 95 5e 80 38 ff 6d	.03_T<.w...^..8.m
00c0	fc 93 f4 97 c4 8f 64 dc a5 34 21 47 38 6d 6e 90	.....d...4!G8mn.
00d0	98 9c ac b4 14 47 86 6e ea 99 80 aa fc 01 f7 fb	.....G.n.....
00e0	cf e7 5f ac 3e 17 7b 8c e6 d5 a9 02 09 f3 cb d7	...>.{.....
00f0	47 0c 6d d6 93 08 95 cc 83 54 f4 05 c7 e3 6f b4	G.m.....T...o.
0100	9e 44 ba 64 62 a6 b0 28 5f 0e 3d db 73 24 d5 25	.D.db..(._.=.s\$.%
0110	01 21 f9 3b e9 67 88 ae cc 19 57 a8 0e 0f db df	!.;.g....W.....
0120	27 3d 2d 71 10 d9 9d 2a b1 00 59 fe 2b fb 07 e5	'=-q...*.Y.+...
0130	ef a3 9e 36 bb 48 64 4e a6 58 2a 2f 03 1d f5 b3	...6.HdN.X*/....
0140	c2 57 72 0c d3 d5 17 01 8d fa d3 e1 17 b9 8e 6a	.Wr.....j
0150	da 81 20 f9 3d e9 73 88 d6 cd 09 51 c8 1b 4f a4	.. .s....Q..0.
0160	5e 26 3b 2b 65 04 a1 e4 3b a7 66 2c ab 14 05 87	^&;+e...;.f,....
0170	e2 ef b1 9e 5a ba 20 63 3e b5 78 40 ee 7d 9a f2	....Z. c>.x@.}..
0180	a1 d0 3b 1f 65 bc a2 74 32 c7 51 6c 18 97 ac 8e	..;.e..t2.Ql....
0190	14 db 85 26 e1 29 b9 0a 69 c2 8b 70 c4 dd 65 30	...&.)...i..p..e0
01a0	a1 5c 38 37 6f 4c 9c 54 b6 04 4b e6 47 aa 6e 02	.\87oL.T..K.G.n.
01b0	9b f0 a7 dc 2f 37 1d 4d b0 52 5e 12 3b 93 66 94	....../7.M.R^.;.f.
01c0	a8 84 0c e7 d5 af 02 1d f3 b3 d6 57 0a 0d c3 d3	.....W....
01d0	77 14 cd 85 52 e0 11 bf 9a 7e a2 f8 31 ef 5b 9c	w...R....~..1.[.
01e0	26 b7 28 4d 0e 51 da 1b 23 a5 36 21 4b 38 45 6e	&.(M.Q..#.6!K8En
01f0	60 9a bc a0 74 3e c7 79 6c e8 ff ff ff ff ff ff	`...t>.yl.....
0200	ff ff ff ff ff ff ff ff	.....

CAS-bitit

Liite 3 SAToP-kehystys G.703-liikenteelle täydellä hyötykuormalla

Frame 916 (282 bytes on wire, 282 bytes captured)
Ethernet II, Src: Alcatel_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92), Dst: Alcatel_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2)
Destination: Alcatel_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2)
Source: Alcatel_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92)
Type: MPLS label switched packet (0x8847)
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131070, Exp: 5, S: 0, TTL: 255
MPLS Label: 131070
MPLS Experimental Bits: 5
MPLS Bottom Of Label Stack: 0
MPLS TTL: 255
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131065, Exp: 5, S: 1, TTL: 255
MPLS Label: 131065
MPLS Experimental Bits: 5
MPLS Bottom Of Label Stack: 1
MPLS TTL: 255
PW Ethernet Control Word
Sequence Number: 18208
Data (256 bytes)

0000	00 25 ba 2e e4 d2 00 25 ba 2e d7 92 88 47 1f ff	.%.%.%.%.G..
0010	ea ff 1f ff 9b ff 00 00 47 20 5d 64 30 a7 5c 2c	.....G]d0.\,
0020	37 17 4d 8c 52 d6 11 0b 99 c6 ab 68 04 8f e4 df	7.M.R.....h....
0030	a5 3e 21 7b 38 e5 6d a0 92 3c 93 74 94 c4 85 64	.>!{8.m.<.t...d
0040	e0 a5 bc 22 77 32 cd 51 50 18 1f af be 1e 7b ba	..."w2.QP.....{.
0050	e6 61 aa ba 00 63 fe b7 f8 4f ee 5f 9a 3e a3 78	.a...C...0._.>.x
0060	34 ef 45 9c 62 b6 b0 48 5e 4e 3a 5b 62 24 b3 24	4.E.b..H^N:[b\$. \$
0070	55 26 01 2b f9 07 e9 ef 8b 9e c6 b9 68 68 8e 8c	U&.+.....hh..
0080	d8 d5 2d 01 11 f9 9b ea a7 80 2e ff 19 fd ab f2	..-.....
0090	07 d3 ef 17 9d 8e b2 d8 51 2e 19 1b a9 a6 0a 2b	.....Q.....+
00a0	c3 07 75 ec c3 95 76 80 c8 fd 4d f0 53 de 17 3b	..u...v...M.S..;
00b0	8d 66 d0 a9 1c 09 b7 ca 4f 42 5c 72 36 d3 49 14	.f.....0B\r6.I.
00c0	49 86 4a ea 41 82 7a f2 e1 d1 bb 1a 65 a2 a2 30	I.J.A.z.....e..0
00d0	33 5f 54 3c 07 77 ec cf 95 5e 80 38 ff 6d fc 93	3_T<.w...^.8.m..
00e0	f4 97 c4 8f 64 dc a5 34 21 47 38 6d 6e 90 98 9c	....d..4!G8mn...
00f0	ac b4 14 47 86 6e ea 99 80 aa fc 01 f7 fb cf e7	...G.n.....
0100	5f ac 3e 17 7b 8c e6 d5 a9 02 09 f3 cb d7 47 0c	_.>.{.....G.
0110	6d d6 93 08 95 cc 83 54 f4 05	m.....T..

Liite 4 CESoPSN-kehystys RS-232 liikenteelle 2 aikavälillä ja 14 hyötykuormatavulla

Frame 1883 (90 bytes on wire, 90 bytes captured)
Ethernet II, Src: Alcatel-_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92), Dst: Alcatel-_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2)
Destination: Alcatel-_2e:e4:d2 (00:25:ba:2e:e4:d2)
Source: Alcatel-_2e:d7:92 (00:25:ba:2e:d7:92)
Type: MPLS label switched packet (0x8847)
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131062, Exp: 0, S: 0, TTL: 255
MPLS Label: 131062
MPLS Experimental Bits: 0
MPLS Bottom Of Label Stack: 0
MPLS TTL: 255
MultiProtocol Label Switching Header, Label: 131067, Exp: 0, S: 1, TTL: 255
MPLS Label: 131067
MPLS Experimental Bits: 0
MPLS Bottom Of Label Stack: 1
MPLS TTL: 255
PW Ethernet Control Word
Sequence Number: 46613
Data (64 bytes)
0000 00 25 ba 2e e4 d2 00 25 ba 2e d7 92 88 47 1f ff .%.%.%.%.G..
0010 60 ff 1f ff b1 ff 00 00 b6 15 88 67 ff ff ff ff `.....g....
0020 ff ff ff ff 50 4b ff ff ff ff ff ff ff ff 75 37PK.....u7
0030 ff ff ff ff ff ff ff ff c0 87 ff ff ff ff ff ff
0040 ff ff c5 e7 ff ff ff ff ff ff 5c 43 ff ffC..
0050 ff ff ff ff ff ff 49 1b ff ffI...

Hyötykuorman bitit ovat kahden ryhmissä